CANMET

RAPPORT 83-17F

Canada Centre for Mineral and Energy Technology

Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

CORROSION DES TUYAUX EN AMIANTE-CIMENT PARTIE 2 – ÉTUDE DU TRAVAIL RÉCENT SUR LA CAUSE DE LA DÉGRADATION DES TUYAUX ET LES AMÉLIORATIONS POSSIBLES

BORIS NEBESAR

57 pp

PROGRAMME DE RECHERCHE SUR LES MINÉRAUX
LABORATOIRES DES SCIENCES MINÉRALES

OCTOBRE 1983

MICROMEDIA

Energy, Mines and Resources Canada | Énergie, Mines et Ressources Canada

Canada

85-3402/

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1985

En vente au Canada par l'entremise de nos

agents libraires agréés
et autres librairies

ou par la poste au:

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa, Canada, K1A 0S9

N° de catalogue M38-13/83-17F
ISBN 0-660-91435-2

Canada: 5,00$
à l'étranger: 6,00$

Prix sujet à changement sans préavis
Available in English

CORROSION DES TUYAUX EN AMIANTE-CIMENT

PARTIE 2 - ÉTUDE DU TRAVAIL RÉCENT SUR LA CAUSE DE LA DÉGRADATION DES TUYAUX ET LES AMÉLIORATIONS POSSIBLES

par

Boris Nebesar*

RÉSUMÉ

Notre compréhension actuelle de la théorie de corrosion, expliquée en termes clairs, peut servir de base pour un contrôle et une prévention améliorés de la corrosion des tuyaux en amiante-ciment.

Le milieu, les agents et les mécanismes de corrosion des tuyaux en amiante-ciment font l'objet d'une étude critique fondée sur des changements récents dans les notions de base et la technologie comprenant l'utilisation de différents ciments et revêtements protecteurs, les changements dans la conception des tuyaux et leurs systèmes, le contrôle de l'écoulement des eaux potables et effluentes, l'emploi de produits bactéricides et l'élimination des fibres d'amiante. Un résumé pour la direction ainsi que des conclusions sont présentés. Cette étude a été faite à l'intention de nombreux lecteurs de diverses disciplines et est fondée sur une documentation comprenant 73 références en six langues dont la plupart proviennent des pays qui effectuent actuellement des études touchant les problèmes des tuyaux en amiante-ciment.

---

*Chercheur scientifique, Laboratoire du traitement des minéraux, Laboratoires des sciences minérales, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa, K1A 0G1

ASBESTOS/CEMENT PIPE CORROSION

PART 2 - REVIEW OF RECENT WORK ON THE CAUSES OF PIPE DEGRADATION AND ON POSSIBLE IMPROVEMENTS

by

Boris Nebesar*

ABSTRACT

Our current understanding of the theory of corrosion, explained in simple language, can provide the basis for improved control and prevention of corrosion of asbestos/cement pipe.

The environment, agents, and mechanisms of corrosion of asbestos/cement pipe are critically reviewed from the viewpoint of recent developments in basic knowledge and technology including use of different cements and protective coatings, changes in design of pipe and systems, control of transported drinking and waste water, use of bactericides, and removal of asbestos fibres. An executive summary and conclusions are given. This review is directed to a wide readership with various backgrounds and is based on 73 references in six languages, mainly from countries actively working on asbestos/cement pipe.

---

*Research Scientist, Mineral Processing Laboratory, Mineral Sciences Laboratories, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, K1A 0G1

TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ	i
ABSTRACT	ii
RÉSUMÉ POUR LA DIRECTION	1
1. INTRODUCTION	4
2. CORROSION DES TUYAUX EN AMIANTE-CIMENT	6
2.1 MILIEUX DE CORROSION	6
2.1.1 Eau	6
2.1.1.1 Eau naturelle	6
2.1.1.2 Eau potable	6
2.1.1.3 Eaux usées	9
2.1.1.4 Eau de mer	10
2.1.2 Sol	10
2.1.3 Air et gaz	11
2.2 AGENTS DE CORROSION ATTAQUANT LES TUYAUX EN AMIANTE-CIMENT	11
2.3 MÉCANISMES DE CORROSION	14
2.3.1 Dissolution des constituants	16
2.3.2 Réactions donnant lieu à des produits solubles	17
2.3.3 Réactions donnant lieu à des produits d'expansion	18
2.3.4 Conversions microbiologiques du soufre	19
2.3.5 Pression des sels de cristallisation	22
3. EXPLICATION THÉORIQUE DE LA CORROSION DES TUYAUX EN AMIANTE-CIMENT	23
3.1 LE pH EN TANT QUE VARIABLE PRINCIPALE - RÔLE DE L'ANHYDRIDE CARBONIQUE - RÔLE DU CALCIUM	23
4. CONTRÔLE ET AMÉLIORATIONS DE LA PRÉVENTION DE LA CORROSION DES TUYAUX EN AMIANTE-CIMENT	27
4.1 CONTRÔLE DE LA TECHNOLOGIE DES TUYAUX EN AMIANTE-CIMENT	28
4.1.1 Modifications de la matrice amiante-ciment	28
4.1.1.1 Composition du ciment	28
4.1.1.2 Composite d'amiante-ciment	30
4.1.1.3 Durcissement de l'amiante-ciment	32
4.1.2 Considérations de conception pour les tuyaux et les réseaux de distribution	32
4.1.3 Enduits et revêtements de protection	32
4.1.3.1 Pose des enduits de protection en cours de fabrication	33
4.1.3.2 Application des revêtements de protection après enfouissement des tuyaux	34
4.1.3.3 Dépôt, après enfouissement, de pellicules de protection à partir de l'eau transportée	37

TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

4.2 CONTRÔLE DU FLUIDE TRANSPORTÉ 38
4.2.1 Traitement de l'eau potable 38
4.2.1.1 Conditionnement de l'eau potable 38
4.2.1.2 Élimination des fibres d'amiante de l'eau potable 39
4.2.2 Traitement des eaux usées 40
4.3 CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT EXTÉRIEUR 41
4.4 UTILISATION DE BACTÉRICIDES 43
5. CONCLUSIONS 43
REMERCIEMENTS 45
RÉFÉRENCES 45
AUTORISATIONS DE REPRODUCTION 50

TABLEAUX

N°

2-1 Classification des eaux naturelles 7
2-2 Composition de l'eau potable: Sommaire des limites recommandées 7
2-3 Analyses d'un groupe d'échantillons d'eau, à des valeurs de pH pour lesquelles SI = 0 9
2-4 Catégories d'eaux résiduaires 10
2-5 Canalisation en amiante-ciment: concentrations et valeurs limites (des agents de corrosion) pour une température $\leq$25°C et en service continu 12
2-6 Effet des produits chimiques d'utilisation courante sur le béton 15
2-7 Observations critiques et possibilités de remplacement de la terminologie de Tillman en ce qui concerne l'équilibre calcium-acide carbonique 18
2-8 Facteurs menant à la formation d'acide sulfurique dans les aires à niveau ouvert 20
3-1 Schéma d'interaction entre le carbonate de calcium solide, les ions Ca^{2+}, CO_3^{2-}, HCO_3^- et l'acide carbonique libre 24
3-2 Relation d'équilibre des ions fondamentaux 25
3-3 Réactions aqueuses prises en considération pour l'établissement de l'indice de saturation (IS) et des diagrammes de précipitation 26
3-4 Réactions à l'état solide prises en considération pour l'établissement du diagramme de l'indice de saturation 27
4-1 Caractéristiques des ciments de départ et propriétés des échantillons A/C 29

TABLEAUX (suite)

N°		Page
4-2	Composition de phase des clinkers	29
4-3	Propriétés de filtration des mélanges de ciment et A/C	29
4-4	Perméabilité à l'eau des enduits organiques	34
4-5	Comparaison de la teneur en tétrachloroéthylène (TCE) entre les tuyaux revêtus de vinyle et de ciment	35
4-6	Équivalents masses de certains produits chimiques de traitement et coût approximatif des produits chimiques en vrac	39
4-7	Réduction de la formation d'hydrogène sulfuré dans les eaux usées	41
4-8	Prévention du dégagement d'hydrogène sulfuré des eaux usées	41
4-9	Récapitulation des méthodes d'élimination de l'hydrogène sulfuré des eaux usées	42

FIGURES

1-1	Diffusion des informations	4
2-1	Dissolution des composés du calcium dans l'eau	16
2-2	Influence du temps de contact sur la profondeur de corrosion	17
2-3	Schéma généralisé de l'oxydation du soufre élémentaire et des composés du soufre réduits par les thiobacilli	20
2-4	Sommaire des étapes de transformation microbiologique du soufre	21
2-5	Coupe d'un tuyau d'égout en béton soumis à des conditions corrosives types	22
2-6	Formation d'une "niche sociale", à partir des fibres A/C, par les micro-organismes producteurs d'acide sulfurique	22
3-1	Interaction du cycle des roches avec celui de l'eau	23
4-1	Corrosion par les eaux acides - après un écoulement de 6 ans dans des tuyaux non protégés	28
4-2	Niveau d'hydratation des ciments à partir de données d'analyse par rayons X	30
4-3	Effet de la densité sur la résistance à la corrosion des matériaux liés au ciment	31
4-4	Courbes de capacité de moulage de l'amiante-ciment par rapport à l'unité	32
4-5	Surface d'un enduit aux résines époxy, atomisé avec l'air avec un solvant (X 1400)	36
4-6	Surface d'un enduit aux résines époxy, atomisé sans air et sans solvant (X 1400)	36

RÉSUMÉ POUR LA DIRECTION

Depuis les temps les plus reculés, l'approvisionnement en eau propre et l'évacuation des eaux usées ont compté parmi les préoccupations les plus fondamentales des nations civilisées. En même temps, la corrosion des conduites est devenue elle aussi une préoccupation importante pour des raisons de construction, d'économie et d'hygiène.

Pendant plusieurs décennies, les tuyaux en amiante-ciment (A/C) ont permis de fournir ces services de base sûrement et à bon marché pour des dizaines de millions de gens. Toutefois, étant donné les préoccupations récentes au sujet du danger de l'amiante, les effets possibles de son ingestion avec l'eau font l'objet d'un examen universel; jusqu'à présent, aucune preuve concluante de son effet néfaste n'a été présentée.

La plus grande partie des nouvelles connaissances sur le problème inhérent à l'utilisation des tuyaux A/C sont d'origine très récente. La corrosion de ces tuyaux et celle d'autres matériaux liés au ciment est régie par les mêmes lois physico-chimiques que celles de la dégradation des roches. Les nouvelles connaissances fondamentales dans la discipline de la chimie de l'eau ont mené à une nouvelle compréhension des processus de dégradation et par conséquent aux possibilités de les contrôler ou de les empêcher. La présente étude fait appel à un recensement des faits les plus récents dans la corrosion des tuyaux A/C.

CORROSION

Pour qu'une matière quelconque soit soumise à la corrosion, il faut que l'eau soit présente. Les agents de corrosion peuvent attaquer un tuyau A/C à partir d'un milieu aqueux, solide ou gazeux. Dans la plupart des cas, cela met en jeu de l'eau naturelle, de l'eau potable, de l'eau résiduaire ou de l'eau de mer qui peuvent agir directement ou à partir d'un sol (solide). (Les gaz, par exemple l'anhydride carbonique, agissent d'habitude par l'intermédiaire d'une phase aqueuse).

Un certain nombre d'agents de corrosion attaquent les tuyaux A/C: les acides (pH<6), les sulfates, les sels de magnésium, les hydroxydes alcalins, l'ammoniaque (tous à des fortes concentrations) et l'eau douce (faible teneur en calcium et carbonate). Certains composés organiques sont eux aussi corrosifs.

L'action corrosive dépend principalement du genre d'agent, de sa concentration, de la durée d'exposition et des conditions de convection.

MÉCANISMES DE CORROSION

Les mécanismes de corrosion qui entrent en jeu dans la dégradation des tuyaux A/C se présentent comme suit:

- simple dissolution, régie par les produits de solubilité des constituants;
- formation de produits de réaction solubles, par exemple après attaque par certains acides (acides chlorhydrique, carbonique);
- formation de produits de réaction donnant lieu à une expansion, par exemple gypse et ettringite des sulfates ou de l'acide sulfurique;
- conversions microbiologiques du soufre à n'importe quelle valence (S^{o}, S^{2-}, SO_4^{2-} menant éventuellement à la formation d'acide sulfurique et se terminant comme dans le cas précédent;
- pression des sels de cristallisation agissant mécaniquement.

Dans tous les cas, la structure A/C est perturbée et des fibres d'amiante peuvent se libérer.

THÉORIE DE LA CORROSION DES TUYAUX EN AMIANTE-CIMENT

Le mécanisme prédominant de la dégradation est l'attaque par l'eau douce. Ce n'est que tout récemment que ce mécanisme a été expliqué de façon exacte sur la base de la thermodynamique chimique et de la solubilité connexe des constituants du ciment.

Dans la nature, l'acidité (pH) des eaux règle la vie biologique dans une fourchette

restreinte. Toutes les eaux contiennent au moins des ions fondamentaux: les cations - hydrogène et calcium - et les anions - hydroxyle, carbonate et carbonate acide. Leurs concentrations ne sont pas arbitraires. Si un déséquilibre se produit dans des conditions données, une dissolution ou une précipitation du carbonate de calcium pourra corriger ce déséquilibre. L'anhydride carbonique de l'atmosphère se dissout dans l'eau et les roches calciques omniprésentes servent de source de calcium. Les flux complexes de masse et d'énergie suivent les règles physico-chimiques établies.

Les mêmes phénomènes exactement ont lieu dans les tuyaux A/C. Si l'eau manque de calcium, les tuyaux sont utilisés comme source de calcium et provoquent ainsi leur dégradation. Par conséquent, il est possible d'évaluer l'état d'un tuyau à partir du pH et de l'analyse chimique grossière de l'eau ainsi qu'à partir des diagrammes de solubilité des éléments en jeu.

CONTRÔLE ET AMÉLIORATION DE LA CORROSION DES TUYAUX A/C

Pour le contrôle de la corrosion d'un tuyau A/C, il existe un choix considérable de mesures permettant un redressement de la composition du tuyau lui-même et du milieu transporté. Il y a moins de possibilités en ce qui concerne le milieu extérieur du tuyau.

MATRICE A/C

Le rendement des tuyaux sous pression et des tuyaux d'eaux résiduaires, fabriqués à partir de divers ciments, a été déterminé au moyen d'essais à long terme sur le terrain. Invariablement, les meilleurs tuyaux avaient été fabriqués à partir de ciment à haute teneur en alumine.

En ce qui concerne les tuyaux sous pression, la meilleure catégorie suivante était celle dont le ciment était fabriqué à partir de scories de hauts fourneaux lui assurant des qualités supérieures aux ciments Portland normaux et les tuyaux les moins résistants étaient composés de ciment exempt de C_3A. La densité constitue de loin la propriété anti-corrosive la plus importante de la matrice A/C. Il y avait peu de différence de rendement entre les tuyaux dont le mûrissement s'était fait par durcissement normal et ceux qui ont été passés à l'autoclave.

En ce qui concerne les tuyaux d'eaux résiduaires, les ciments à forte teneur en alumine augmentaient de cinq fois la durée de ces tuyaux par rapport à ceux qui sont fabriqués avec du ciment Portland ordinaire. Les tuyaux durcis en autoclave avaient aussi un meilleur rendement que ceux qui ont été durcis normalement.

Sur la base des considérations théoriques, rien ne peut encore dépasser le rendement de l'amiante dans la matrice A/C, particulièrement dans la fabrication fortement automatisée des tuyaux. La clé de ce fort rendement est la distribution homogène de l'amiante dans la matrice.

REVÊTEMENT DES TUYAUX

L'expérience et le choix le plus considérables dans la protection des tuyaux se retrouvent dans les revêtements internes et externes qui doivent être appliqués pendant la fabrication: bitume, brai de houille (pour l'extérieur seulement), résine époxy et brai de houille, résine époxy. Tous ces moyens constituent une protection efficace du tuyau pendant une très longue durée. Ce sont aussi les meilleurs moyens de protection contre le milieu corrosif extérieur, par exemple l'action bactérienne sur le soufre.

Si la destruction de la surface des tuyaux enfouis de faible diamètre est sévère, seul un revêtement ponctuel peut être appliqué. Des revêtements de mortier de ciment et de calcite sont utilisés et appliqués mécaniquement.

TRAITEMENT DE L'EAU POTABLE

C'est un traitement utilisé depuis longtemps et un moyen efficace de protection des tuyaux. Bien qu'il soit coûteux, il peut empêcher l'accumulation des coûts de la corrosion des réseaux. L'eau dépose un film mince provenant de l'addition continue d'un produit chimique approprié. Le plus souvent, on utilise de la chaux qui se dépose sous forme de carbonate de calcium. De nouvelles recherches ont montré que certains composés du zinc peuvent constituer une

solution alternative et viable. Certaines eaux naturelles contiennent des composés du fer, du manganèse et du silicium qui forment un film protecteur. Toutes les techniques utilisées doivent satisfaire les strictes exigences de qualité de l'eau.

Pendant le traitement classique de l'eau, on peut éliminer une quantité importante de fibres d'amiante de l'eau traitée.

TRAITEMENT DES EAUX RÉSIDUAIRES

Ce traitement est beaucoup plus difficile, étant donné qu'un plus grand mélange d'agents potentiellement corrosifs peuvent être présents dans les eaux usées. Une méthode complète est nécessaire; les planificateurs, les concepteurs-projeteurs et les constructeurs de réseaux ainsi que le personnel d'exploitation de ces réseaux doivent collaborer de façon très étroite dans toutes les phases d'exploitation. Comme agents corrosifs particulièrement abondants dans les eaux résiduaires, on trouve des composés du soufre qui sont transformés par action bactérienne en acide sulfurique. La gestion du déplacement et de l'aération est plus importante que le traitement chimique qui est utilisé en dernier ressort. S'il y a lieu, l'oxygène technique est le meilleur des traitements.

1. INTRODUCTION

L'utilisation ou la non-utilisation de l'amiante est devenue une grave question d'ordre social dans le monde entier. Des conférenciers de nombreuses disciplines ont essayé de résoudre cette question au cours d'un récent congrès mondial sur l'amiante qui a été tenu "afin de dresser une analyse aussi objective et complète que possible de la question de l'amiante" (1). Toutefois, le congrès a peut-être soulevé encore plus de questions qu'il n'en a résolues, tandis que certains problèmes particulièrement graves de l'utilisation des produits à base d'amiante n'ont pas été résolus.

Le tuyau en amiante-ciment (A/C) est un de ces produits. Il est utilisé dans le monde entier et sur une grande échelle, en particulier pour le transport de l'eau potable et des eaux résiduaires. La première partie de l'étude présente les données historiques du problème de la corrosion des tuyaux A/C (2).

Dans un récent rapport sur la lixiviation d'un matériau A/C, Anderson et Stone ont fait remarquer que: "des chercheurs ont appris énormément de choses au sujet de la détérioration de l'amiante-ciment dans l'eau. Toutefois, ces renseignements n'ont pas encore atteint les manuels et les ouvrages de référence" (3). Apparemment, il y a un problème de diffusion des renseignements disponibles et d'application opportune de ces derniers.

En dépit de toutes les bases de données informatisées, rien ne peut encore remplacer l'examen détaillé de la littérature spécialisée. Herring a montré que bien plus de renseignements relatifs au travail personnel sont disponibles aujourd'hui, par rapport à ce qu'on avait auparavant, mais que ces renseignements doivent être rendus accessibles par un examen de la littérature et ils doivent être utilisés, si l'on espère résoudre des problèmes aussi complexes que celui de la corrosion des tuyaux en amiante-ciment (fig. 1-1) (4). Comme Schock et Buelow l'ont montré récemment, la solution de ces problèmes exige l'apport de nombreux domaines (5).

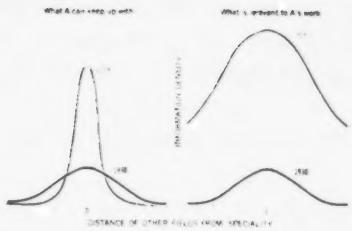


Fig. 1-1 - Diffusion des informations.
À gauche, différents domaines d'information avec lesquels "A" peut rester en contact. À droite, informations qui se rapportent aux travaux de "A" (4)

La corrosion des tuyaux A/C n'est pas un phénomène nouveau et ceux qui se sont familiarisés avec ce genre de tuyaux se sont toujours rendu compte du danger potentiel provenant de sa dégradation. Par conséquent, ils ont principalement étudié sa résistance mécanique et chimique ainsi que la sécurité et la qualité de l'eau transportée, bien avant les efforts actuels de solution du problème d'ingestion de l'amiante.

De nombreuses études, pouvant être retracées jusqu'en 1930, ont été faites sur le rendement couronné de succès sur le terrain des tuyaux A/C, comme l'ont résumé Huenerberg et Tessendorff (6). Denison et Romanoff ont donné un compte rendu sur une recherche étendue, et très souvent citée par après, sur l'effet d'exposition à des sols sur les propriétés des tuyaux A/C (7).

Étant donné les énormes pertes économiques, si ce n'était que la seule raison, la corrosion des tuyaux d'adduction d'eau a toujours été l'objet d'une source de préoccupation. Merrill et Sanks ont signalé que les pertes estimées aux États-Unis se chiffraient à 375 millions de dollars par an et auraient pu être évitées si de la chaux, ne valant que ~7 % de cette somme, avait été utilisée pour stabiliser les eaux corrosives (8).

L'apparition des préoccupations au sujet des effets de l'amiante sur la santé remonte à la fin des années 60. Au Royaume-Uni, des études sur les effets de l'amiante inhalé ont mené au bannissement de la crocidolite (9). Au même

moment à peu près, plusieurs groupes, y compris les fabricants de tuyaux en amiante-ciment, ont commencé des recherches détaillées sur la présence de l'amiante dans l'eau potable. Cunningham et Pontefract (10), et Quint (11) ont fait état de leurs recherches en 1971. En 1974, Kay a présenté des données détaillées d'études sur le terrain en ce qui concerne les quantités de fibres d'amiante trouvées dans toutes les eaux de surface de l'Ontario et a conclu: "Le ministère de la Santé de l'Ontario a indiqué que l'ingestion d'amiante à ces niveaux ne semble pas présenter de danger pour la santé. La recherche se poursuivra, particulièrement afin d'établir s'il y a un niveau d'ingestion de l'amiante qui ne doit pas être dépassé" (12).

À la même époque, l'American Water Works Association Research Foundation (Fondation américaine de recherche de l'Association des distributeurs d'eau) a signalé dans son étude détaillée du problème de l'amiante dans l'eau qu'"aucune preuve actuelle ne semble indiquer qu'il y ait un risque (...risque accru de cancer à partir de l'amiante présent dans l'eau,...)" (13). La Fondation de recherche a prévu des objectifs particuliers à long terme dans les domaines médicaux et technologiques afin de résoudre les questions relatives à la présence d'amiante dans les réseaux d'eau potable, la normalisation des méthodes de détermination de l'amiante, le comportement des tuyaux A/C ainsi que des essais en laboratoires et sur le terrain des tuyaux A/C.

À la suite d'efforts accrus, de nombreuses données sont devenues disponibles, comme les études sur l'eau potable de 71 municipalités canadiennes (14), signalées aussi par Toft et ses collaborateurs (15), et plus de 1 500 analyses de l'eau aux États-Unis dont le compte rendu a été fait par Millette et ses collaborateurs (16). Ces données ont confirmé qu'une faible proportion des eaux analysées (environ ~5 % au Canada et environ ~15 % aux États-Unis) avaient une teneur en fibres d'amiante supérieure à la moyenne. En plus des sources naturelles, leur origine est imputable, dans un certain nombre de cas, aux tuyaux A/C.

Les résultats combinés des mesures en laboratoires et sur le terrain ont commencé à montrer que l'indice normalisé d'agressivité (AI) utilisé pour prédire la tenue du tuyau A/C n'était pas fiable dans des conditions inconnues. Buelow et ses collaborateurs ont observé des conditions dans lesquelles l'eau était plus ou moins agressive que ne le prédisait l'indice AI (17). Kanarek et ses collaborateurs sont arrivés aux mêmes conclusions et ont trouvé qu'une eau nominalement non agressive a libéré de grandes quantités de fibres d'amiante au cours de son acheminement dans le tuyau A/C (18).

Les contributions de nombreux groupes et les nouvelles connaissances fondamentales, notamment dans le nouveau domaine de la science aquatique qui rassemble par elle-même un certain nombre de disciplines, ont conduit Schock et Buelow à donner une nouvelle explication théorique du comportement des tuyaux A/C (5). Sans aucun doute, cette explication théorique mènera aussi à une réévaluation de notre raisonnement actuel au sujet du béton soumis à des conditions corrosives.

Dans la Partie 2 de la présente étude, les milieux ambiants, les causes et les mécanismes de la corrosion, les récentes explications théoriques et certaines améliorations de son contrôle sont examinés.

En général, des références multilingues ont été examinées jusqu'à la fin de 1981 avec certains ajouts ultérieurs*. Les tuyaux en amiante-ciment sont considérablement utilisés dans les pays qui ne sont pas d'expression anglaise et où d'importantes contributions ont été faites pour comprendre les problèmes et la technologie qui y sont liés. Toutefois, cette connaissance est restée ignorée à cause des problèmes de langue.

Dans une étude critique, l'auteur puise entièrement dans le travail des autres. Les travaux des auteurs suivants ont été consultés le

---

*Le manuscrit a été présenté en décembre 1982 sous le titre: Division Report MRP/MSL 82-141(R); Mineral Sciences Laboratories, CANMET, Energy, Mines and Resources.

plus souvent: Anderson et Stone (3), Schock et Buelow (5), Huenerberg et Tessendorff (6), Buelow, Millette, McPharen et Symons (17), Eick (19,20), Carrière (21), Marks et Hutchcroft (22), Neveux (23), Franquin (24), Stumm et Morgan (25), Lea (26), Grohmann (27), étude anonyme CEOCOR (28), Crennan, Simpson et Parker (29), Schock, Logsdon et Clark (30), Halleux et Bhatnagar (31).

2. CORROSION DES TUYAUX EN AMIANTE-CIMENT

2.1 MILIEUX DE CORROSION

La corrosion des tuyaux en amiante-ciment se passe dans un milieu complexe. Des eaux de diverses catégories peuvent agir sur les surfaces internes ou externes, des sols en contact avec le tuyau peuvent être secs ou humides par moments, l'air peut être absent ou présent. Tous ces milieux changent constamment en fonction des forces de la nature et en fonction du temps; par conséquent, ces milieux de corrosion sont décrits brièvement.

2.1.1 Eau

L'eau est la substance prédominante à la surface du globe. Sans elle, il n'y aurait pas de vie et aussi aucune corrosion. En effet, la vie biologique s'arrête à l'extérieur d'une étroite fourchette de pH. Par conséquent, le pH de la plupart des eaux naturelles va de 6 à 9.

Halleux et Bhatnagar ont résumé les principales caractéristiques de l'eau naturelle en ce qui concerne sa composition (3). Mis à part la composition chimique particulière à l'eau, trois catégories principales de substances y sont présentes: des matières en suspension, dissoutes et dissociées.

Une importante catégorie de matière en suspension est l'amiante ou les minéraux amiantoides. Ils sont présents dans de nombreuses eaux naturelles et proviennent de l'érosion, du transfert par l'atmosphère ou d'activités industrielles comme l'exploitation minière. Dans l'eau potable, on peut trouver de l'amiante en plus, dans certaines conditions, après le transport dans des tuyaux en amiante-ciment ou à la suite d'utilisation de méthodes erronées de piquage de ces tuyaux (16).

Les principales matières dissoutes dans l'eau naturelle sont les gaz (oxygène, anhydride carbonique, etc.), mais de faibles quantités de nombreuses substances, y compris la matière organique, y sont aussi dissoutes.

La matière dissociée existe sous deux formes; soit les cations et les anions. Ce n'est que sous ces formes que la matière peut réagir, cela est fort différent de la matière dissoute. L'eau naturelle contient toujours les cations fondamentaux H^+, Ca^{2+} et les anions OH^-, HCO_3^-, CO_3^{2-}. L'eau est appelée "eau idéale" si seulement ces ions sont présents. Plus souvent, d'autres ions, appelés ions "caractéristiques" sont présents en quantités diverses. Les cations sont Mg^{2+}, Na^+ (K^+) et les anions sont SO_4^{2-}, Cl^-,(NO_3^-). Leurs présence et quantité caractérisent le type d'eau.

Bien qu'il n'existe qu'une seule substance définie comme étant l'eau, il est commode, en pratique, de répartir l'eau en plusieurs catégories.

2.1.1.1 *Eau naturelle*

L'eau naturelle est souvent appelée eau douce. Elle provient des précipitations et acquiert une composition caractéristique pendant qu'elle est en contact avec la surface et le sous-sol de la terre. Neveux catégorise les eaux en sept classes, avec des sous-classes supplémentaires, en fonction de leur teneur caractéristique en substances (23). Le tableau 2-1 résume leurs dureté et minéralisation.

La majorité des eaux naturelles forme un système ouvert avec l'atmosphère.

2.1.1.2 *Eau potable*

Lorsque l'eau naturelle est traitée ou directement acheminée pour la consommation humaine, elle est appelée eau potable. En pratique, il existe de grandes différences, mais en général on inclut dans cette catégorie l'eau qui a été traitée de façon appropriée, possède la qualité requise dans les limites prescrites et

est distribuée par transport au moyen de tuyaux appropriés, c'est-à-dire dans un circuit fermé sous pression afin d'en assurer le contrôle le plus complet. Le tableau 2-2 donne la composition de l'eau potable et un résumé des limites recommandées (33). Le tableau 2-3 énumère la composition d'une variété d'eaux potables types (27). Pour l'instant, seules les trois dernières colonnes nous intéressent, c'est-à-dire celles

Tableau 2-1 - Classification des eaux naturelles (23)

No.	Caractéristiques de l'eau	Dureté Degré français*	Minéralisation mg/L approx.
1.	Très douce et aucune minéralisation	0-3	0-50
2.	Douce et faible minéralisation	4-12	40-120
3.	Moyennement dure et légère minéralisation	14-35	120-500
4.	Considérablement dure et minéralisation instable	40-65	500-1000
5.	Extrêmement dure et forte minéralisation; eaux anormale ou accidentelle	60-120	>1000
6.	Douce et minéralisée de façon appréciable	quelques	variable mais toujours détectable
7.	Artificiellement adoucie; très agressive si elle ne reçoit pas un traitement supplémentaire		

* 1 degré français = 10 mg $CaCO_3$/L

Tableau 2-2 - Composition de l'eau potable:
Sommaire des limites recommandées (32)

Paramètre	Concentration maximale admissible*	Concentration objective*	Base**
Aldrine + dieldrine	0,0007	$\leq 5 \times 10^{-8}$	H
Antimoine	-	$\leq$0,0002	H
Arsenic	0,05	$\leq$0,005	H
Amiante	-	-	-
Baryum	1,0	$\leq$0,1	H
Bore	5,0	$\leq$0,01	H
Cadmium	0,0005	$\leq$0,001	H
Carbaryle	0,07	$\leq 5 \times 10^{-4}$	H
Chlordane (Total)	0,0007	$\leq 5 \times 10^{-8}$	H
Chlorure	250	<250	A
Chrome	0,05	$\leq$0,0002	H
Couleur (UTC)	15	<15	A
Cuivre	1,0	<1,0	A
Cyanure	0,2	$\leq$0,002	H
DDT (Total)	0,03	$\leq 5 \times 10^{-8}$	H

Tableau 2-2 - suite

Paramètre	Concentration maximale admissible*	Concentration objective*	Base**
Diazinon	0,014	$\leq 1 \times 10^{-6}$	H
Dieldrine + aldrine	0,0007	$\leq 5 \times 10^{-8}$	H
Endrine	0,0002	$\leq 5 \times 10^{-8}$	H
Fluorure	1,5	1,0***	H&A
Dureté	-	-	-
Heptachlore + heptachlorepoxide	0,003	$\leq 5 \times 10^{-8}$	H
Fer	0,3	<0,05	A
Plomb	0,05	≤0,001	H
Lindane	0,004	$\leq 1 \times 10^{-7}$	H
Manganèse	0,05	<0,01	A
Mercure	0,001	≤0,0002	H
Méthoxychlore	0,1	$\leq 5 \times 10^{-8}$	H
Méthyleparathion	0,007	$\leq 1 \times 10^{-6}$	H
Nitrate (sous form de N)	10,0	≤0,001	H
Acide nitrilotriacétique (ANT)	0,05	≤0,0002	H
Nitrite (sous form de N)	1,0	≤0,001	H
Odeur	-	inoffensive	A
Parathion	0,035	$\leq 1 \times 10^{-6}$	H
Pesticides (Total)****	0,1	-	H
pH	6,5-8,5	-	A
Phénols	0,002	<0,002	A
Sélénium	0,01	≤0,002	H
Argent	0,05	≤0,005	H
Sodium	-	-	-
Sulfate	500	<150	H&A
Sulfure (sous forme de H_2S)	0,05	<0,05	A
Saveur	-	Inoffensive	A
Température(°C)	15	<15	A
Total des solides dissous	500	-	A
Carbone organique total	-	-	-
Toxaphène	0,005	$\leq 5 \times 10^{-8}$	A
Trihalométhanes	0,35	≤0,0005	H
Turbidité (UNT)	5	<1	H&A
Uranium	0,02	≤0,001	H
Zinc	5,0	<5,0	A
2,4-D	0,1	≤0,001	H
2,4,5-TP	0,01	≤0,001	H

* Sauf indication contraire, les concentrations maximales admissibles et les concentrations objectives sont précisées en mg/L.

** Les concentrations maximales admissibles et les concentrations objectives ont été établies sur la base de considérations esthétiques (A) ou d'hygiène (H).

Tableau 2-2 - suite

*** Dans les régions où la température annuelle moyenne et maximale est inférieure à 10°C, la concentration objective est de 1,2 mg/L.

**** La limite des "pesticides totaux" s'applique à l'eau dans laquelle plus d'un des pesticides énumérés dans ce tableau est présent, auquel cas, la somme de leurs concentrations ne devrait pas dépasser 0,1 mg/L.

Nota - Amiante: Il n'existe pas de renseignements suffisants sur lesquels on pourrait fonder une norme de concentration maximale admissible pour l'amiante dans l'eau potable. L'amiante peut être introduit dans les eaux naturelles par une dissolution des roches contenant de l'amiante et à partir des effluents industriels. L'utilisation des tuyaux en amiante-ciment dans les réseaux publics de distribution d'eau potable peut contribuer à la teneur en amiante de l'eau potable. En outre, bien que peu de données quantitatives soient disponibles, les aliments sont une source importante d'amiante ingéré par les humains. L'exposition à l'amiante en suspension dans l'air est un danger bien documenté au titre de la santé; une preuve identique d'un risque d'hygiène associé à l'exposition à l'amiante par ingestion n'a pas été trouvée.

Tableau 2-3 - Analyses d'un groupe d'échantillons d'eau à des valeurs de pH pour lesquelles SI = 0 (eaux à l'équilibre de calcium-anhydride carbonique) (27)

		valeur-m mmol/L	valeur-p mmol/L	Q_e mmol/L	Ca^{++} mmol/L	μ^* mmol/L	pH avec SI = 0 20°C
1	Tübingen	6,8	-1,3	8,1	5,5	25	6,90
2	Mannheim (Freudenheim)	6,1	-0,9	7,0	3,6	14	7,05
3	Munich	5,8	-0,3	6,1	2,15	10	7,26
4	Berlin	3,85	-0,2	4,05	1,85	10	7,49
5	Réseau du lac de Constance	2,50	-0,1	2,6	1,25	5	7,75
6	Hanovre (Nord)	1,85	-0,08	1,93	1,5	7	7,84
7	Francfort (Schwanheim)	1,63	-0,08	1,71	0,6	3	8,21
8	Siegburg (Wahnbachtalsperre)	0,78	+0,02	0,75	0,58	3	8,57
9	Francfort (Spessart)	0,47	+0,03	0,44	0,2	1	9,20
10	Usine de traitement du Harz (Okertalsperre)	0,32	+0,04	0,28	0,22	1	9,41

* μ est la force ionique de l'eau à laquelle tous les ions contribuent.

qui montrent le pH, la concentration en calcium et la force ionique qui est une mesure de tous les ions contenus.

2.1.1.3 *Eaux usées*

Les eaux usées sont beaucoup plus complexes que l'eau potable ou même que l'eau naturelle. Dans cette catégorie nous incluons l'eau d'égout (des villes) et un grand nombre d'eaux résiduaires de l'industrie. Le tableau 2-4 contient différentes catégories d'eaux d'égout données par Crennan et ses collaborateurs (29).

Les eaux usées sont transportées dans des tuyaux par gravité ou sous pression artificielle. Si le transport se fait par gravité, le liquide peut avoir une surface ouverte. Étant

Tableau 2-4 - Catégories d'eaux résiduaires (29)

1.	Eau résiduaire résidentielle, normale et douce (non salée), sans déchets commerciaux, dans des égouts sous pression et par gravité.
2.	Eau résiduaire contenant des acides minéraux ou organiques dérivés des déchets alimentaires.
3.	Exposition extérieure ou intérieure aux eaux souterraines contenant du CO_2 agressif ou des sulfates neutres.
4.	Eau résiduaire contenant des quantités excessives de matières grasses.
5.	Eau résiduaire septique contenant du H_2S s'écoulant dans des égouts par gravité et dans des conduites principales sous pression.

donné leurs grandes variations de composition, les eaux usées sont beaucoup plus difficiles à contrôler que l'eau potable.

2.1.1.4 *Eau de mer*

Le gros de l'eau sur la planète est de l'eau de mer. Cette eau a une composition particulière qui est remarquablement stable et ne s'obtient pas par évaporation de l'eau naturelle.

La composition moyenne des sels de l'eau de mer est donnée par Franquin (24):

NaCl	27 g/L
$MgCl_2$	4
$MgSO_2$	1,7
K_2SO_4	0,9
$CaSO_4$	1,3
$Ca(HCO_3)_2$	4,15

Mis à part ces sels, qui peuvent être directement engagés dans la corrosion, il y a aussi des micro-organismes qui ont aussi une influence sur le processus de la corrosion.

2.1.2 Sol

Les tuyaux A/C sont d'habitude enfouis dans le sol sous forme de réseaux intégrés. La terre ou, de façon interchangeable, le sol ou le terrain, soutient les tuyaux, mais peut aussi réagir avec la surface extérieure des tuyaux. En réalité, l'eau contenue dans le sol est le vecteur de la corrosion. Neveux a décrit l'influence des sols sur les pipe-lines (23).

Les sols sont définis comme étant les couches de surface du terrain formées à partir des roches décomposées et par d'autres processus; ils sont appropriés pour l'agriculture tandis que le sous-sol ne l'est pas. Les sols sont composés de couches rocheuses, sablonneuses, argileuses ou calcaires, formant toutes des sols dits "bons" ou "mauvais" du point de vue de la corrosion et sont renouvelés et transformés de façon continue par des actions physiques, chimiques et biologiques.

Les caractéristiques physiques du sol comprennent sa nature pétrologique, sa granulométrie, sa porosité, son humidité, sa densité apparente, son pH, sa résistivité et son potentiel d'oxydo-réduction. Un tracé de pipe-line est aussi influencé par des caractéristiques topographiques, géographiques, géologiques, botaniques, biologiques et électriques.

La corrosion dépend principalement de la quantité d'eau qu'un sol peut retenir. Cette propriété dépend à son tour de la porosité d'un sol, qui est définie comme étant le rapport du volume des vides à la densité apparente pour une masse donnée. La densité apparente des sols va en général de 1,4 à 2,0; la matière organique réduit cette densité. Le diamètre des pores et la nature des constituants déterminent, par action capillaire et par absorption, la capacité du sol de retenir de l'eau. En fonction aussi du climat et de la perméabilité du sous-sol, tous les niveaux d'humidité, de sec à mouillé, peuvent exister.

Les propriétés chimiques du sol dépendent de ses constituants solubles et insolubles. Les constituants insolubles, composés de divers composés oxygénés, forment la structure minérale. Bien que le carbonate de calcium soit insoluble en général, il se dissout en présence d'anhydride carbonique. La couleur rouge ou brune des sols indique des oxydes de fer de valence élevée, la couleur grise évoque un état d'oxydation plus faible et une couleur noire témoigne de l'accumulation de matières organiques.

Les principaux constituants solubles des sols sont les cations d'hydrogène, de sodium, de

potassium, de magnésium et de calcium, et les anions de carbonate, d'acide carbonique, de nitrate, de chlorure et de sulfate. Des ces ions, l'hydrogène, le chlorure et le sulfate augmentent l'agressivité de l'eau tandis que le calcium la réduit par son effet tampon.

Il faut faire la différence entre l'eau du sol, retenue dans le sol, et les extraits du sol, qui sont drainés des sols après extraction.

Une caractéristique importante des sols est leur acidité. Elle provient de l'action de l'eau sur le sol, de l'échange d'ions, de la présence de matières d'humus, du type de la végétation de surface, de la vie biologique et de la circulation de l'anhydride carbonique. Il y a deux mesures d'acidité entre lesquelles il n'existe pas de corrélation directe. Le pH est une mesure de l'intensité d'attaque initiale et est influencé par les effets tampons, par exemple les acides humiques tandis que l'acidité totale (titrable) donne l'agressivité absolue comme étant la réserve complète d'ions hydrogènes.

Les caractéristiques biologiques des sols proviennent de la matière organique, qui est constituée par les restes de la végétation et des animaux qui y sont présents, en particulier dans les couches de surface de tous les sols. La décomposition de cette matière organique suivant les cycles du carbone, de l'azote et du soufre produit des composés corrosifs. Les réactions sont le plus dangereuses dans les sols étant donné l'intense activité bactérienne qui les accompagne. Il est impossible d'énumérer toutes les bactéries et tous les micro-organismes, mais il y a des centaines de millions de bactéries dans 1 cm^3 de sol. Nous faisons la différence entre les bactéries aérobies qui exigent de l'oxygène et dont la croissance est favorisée dans les sols légèrement aérés et les bactéries anaérobies qui n'ont pas besoin d'oxygène et qui prolifèrent dans les sols fortement compactés. Leurs nombre et activité dépendent de l'humidité et de la température saisonnières.

D'un point de vue pratique, les sols les plus agressifs et ceux qui présentent le plus grand danger de corrosion sont les argiles compactes, les sols de tourbe, à forte teneur en sels solubles, principalement humides et faiblement aérés. Heureusement, le tuyau A/C n'est pas métallique et n'est pas conducteur, et par conséquent il n'est pas sujet à une corrosion fondée sur les phénomènes électrochimiques et l'oxydation. Toutefois, il n'existe ni des sols absolument non agressifs ni des revêtements complètement protecteurs; de telle sorte que la corrosion peut seulement être ralentie, mais pas arrêtée. Par conséquent, le choix du tracé d'un pipe-line proposé à travers différents types de sol, est des plus critiques.

2.1.3 Air et gaz

Les tuyaux A/C sont aussi utilisés pour le transport de l'air et du gaz de ville, dans des conduites tant aériennes qu'enfouies. Les gaz de l'air, notamment l'anhydride carbonique, sont très importants en ce qui concerne le processus de corrosion bien qu'ils n'agissent pas directement.

Un exemple de composition du gaz de ville tiré du charbon (en ppm) est donné ci-dessous (33):

pH	-	6,7	Hydrocarbures aliphatiques	-	74
CO_2	-	1474	Hydrocarbures non saturés	-	193
H_2S	-	7	Cétones	-	430
Mercaptans	-	279	Nitrites		
NH_3	-	130	Acides organiques		
HCN	-	33	(aliphatiques)	-	121
HCNS	-	31	Phénols:		
SO_4	-	225	monohydriques	-	153
Bases azotées avec radicaux			polyhydroxyles	-	1050
NH_2	-	150	Aminophénol	-	872
Tous les alcools	-	378	Amides acides	-	18

Ici aussi, le gaz agit sur le tuyau A/C par le condensat plutôt que directement, mais le fluide principal qui est transporté est gazeux.

2.2 AGENTS DE CORROSION ATTAQUANT LES TUYAUX EN AMIANTE-CIMENT

On peut vraiment ajouter peu de choses à la compilation détaillée, faisant autorité, établie par le CEOCOR en ce qui concerne les agents de corrosion qui attaquent les tuyaux A/C (28). Le résumé de cette compilation est donné au tableau 2-5. Pour l'instant, seule la première colonne nous intéresse.

Tableau 2-5 - Canalisation en amiante-ciment: concentrations et valeurs limites (des agents de corrosion) pour une température $\leq$25°C et en service continu (28)

Désignation	Sans protection		Protection extérieure	Protection intérieure			
Type d'enduit	-		Brai de houille	Bitume de pétrole	Brai de houille	Brai époxy	Époxy
pH	$\geq$6		$\geq$4,5	$\geq$4,5	$\geq$4,5	$\geq$3,5 (*)	$\geq$3,5(*)
Acidité titrée en mL de NaOH (N/10) pour 100 g de sol	<20		<30	-	-	-	-
Dureté en degrés français	>5		pas de limite	pas de limite	pas de limite	pas de limite	pas de limite
CO_2 agressif: mg/L CO_2	(**)		<30 mg/L	<30 mg/L	<30 mg/L	pas de limite	pas de limite
SO_4 = mg/L en fonction de Cl mg/L ciment Portland à 8-10 % C_3A	Cl mg/L	SO_4 mg/L	pas de limite	pas de limite	pas de limite	pas de limite	pas de limite
	0	<500					
	3000	<800					
	5000	<1430					
NH_4 = mg/L	<80	pas de limite	pas de limite	pas de limite	pas de limite	pas de limite	
MgO = mg/L en fonction de SO_4 mg/L	SO_4 mg/L	MgO mg/L	pas de limite	pas de limite	pas de limite	pas de limite	pas de limite
	0	<2000					
	200	<700					
Hydroxydes alcalins	< 10 %		pas de limite	pas de limite	pas de limite	pas de limite	pas de limite
Huiles végétales et animales mg/L	<300		pas de limite	<300	pas de limite	pas de limite	pas de limite

Tableau 2-5 - suite

Désignation	Sans protection	Protection extérieure	Protection intérieure			
Type d'enduit		Brai de houille	Bitume de pétrole	Brai de houille	Brai époxy	Époxy
Alcools inférieurs et solvants non polaires:						
- Esters-cires-acides gras-savons	ne résiste pas	ne résiste pas aux esters	ne résiste pas aux esters	ne résiste pas aux esters	ne résiste pas aux esters	ne résiste pas aux esters
- Benzol-toluol-xylol	pas de limite	pas de résistance de l'enduit	pas de résistance de l'enduit	pas de résistance de l'enduit	pas de résistance de l'enduit	pas de résistance de l'enduit
Alcools supérieurs et solvants polaires:						
- Glycol-glycérine-acétone	ne résiste pas	ne résiste pas	ne résiste pas	ne résiste pas	ne résiste pas	ne résiste pas
- Phénol mg/L	<70	≤1000	≤1000	≤1000	≤10 000	l'acétone
- Sucre	pratiquement inattaqué	pas de limite	pas de limite	pas de limite	pas de limite	pas de limite
En cas de fermentation production de CO_2 et d'acides acétique, lactique,...	ne résiste pas	risque estimé en fonction du pH	risque estimé en fonction du pH	risque estimé en fonction du pH	risque estimé en fonction du pH	risque avec estimé en fonction du pH

(*) Tolère des concentrations d'acide plus élevées occasionnellement et pendant des temps courts

(**) Compte tenu de la complexité de l'équilibre pour les eaux douces: demander au producteur

La plus grande partie de ce rassemblement de données est fondée sur les travaux expérimentaux d'Eick (19) qui, en sa qualité de membre du Comité de rédaction du CEOCOR, a traduit le rapport en allemand (34). Huenerberg et Tessendorff ont aussi rendu compte de leurs résultats expérimentaux (6).

Mis à part la liste des agents de corrosion reconnus, comme les acides inorganiques et certains acides organiques, les sulfates, l'acide carbonique, les sels de magnésium, l'eau douce, l'ammoniaque et les hydroxydes, le guide donne des renseignements importants sur les propriétés corrosives moins bien connues de certains composés organiques.

Le tableau 2-6, de l'American Concrete Institute (ACI) Manual (manuel de l'Institut américain du béton) (35) dresse une autre liste d'agents de corrosion. Bien qu'ils se rapportent au béton, les renseignements sont tout aussi valables pour l'étude des problèmes de corrosion de la matrice A/C qui est, elle aussi, un matériau lié au ciment.

2.3 MÉCANISMES DE CORROSION

La corrosion de pratiquement tous les matériaux est un problème des plus anciens. Le tuyau A/C n'est pas une exception car tous les matériaux fondés sur des liants hydrauliques sont sujets à corrosion.

Les premières observations ont été liées aux tuyauteries en métal et en béton utilisées à l'époque pour la distribution de l'eau. Tous ces tuyaux étaient affligés de certains problèmes de corrosion à cause de la sécurité (plomb, zinc, cuivre), de la qualité perturbée de l'eau (fer), ou de la résistance mécanique (béton et fer). Il était bien naturel d'essayer de trouver pour les problèmes de la corrosion, des solutions qui soient analogues aux méthodes et à l'expérience concernant les matériaux connus. Ce n'est que très lentement qu'une compréhension complète des mécanismes de corrosion de la matrice A/C a vu le jour.

Franquin établit certaines hypothèses de base au sujet de la corrosion du béton: c'est la conséquence de phénomènes chimiques entre le milieu ambiant et la pierre de ciment et ce sont, en plus, des phénomènes physiques qui permettent la pénétration des fluides agressifs dans la masse (24). L'eau est indispensable pour les réactions et le transport des agents agressifs. L'évolution des phénomènes de corrosion varie en fonction de l'alternance de l'humidité et de la sécheresse qui accélère ou retarde ces phénomènes. Les variations de température et de milieu ambiant, le lessivage répété par les eaux de mer et les eaux pures ainsi que les incrustations de sel, peuvent toutes contribuer à la corrosion. Il n'y a aucune règle générale.

À titre d'exemple récent de cet état de choses, Helms et McCoy ont montré comment des conclusions erronées ont été atteintes au titre de l'action corrosive des sulfates sur les tuyaux A/C lorsqu'on supposait, il y a un certain temps, que l'exposition intermittente à un milieu alternativement humide et sec serait plus destructive qu'une exposition continue. En fait, c'est tout le contraire qui se passe (36).

Selon Eick (19), Huenerberg et Tessendorff (6) et l'étude du CEOCOR (28) les propriétés du matériau A/C, du point de vue de la corrosion sont considérablement différentes de celles de ses homologues en métal et en béton. L'A/C, qui se caractérise par une faible conductivité électrique, n'est donc pas sujet à la corrosion électrochimique due à la formation de cellules de corrosion ou à des courants de Foucault qui exigent une protection importante de la tuyauterie métallique. Ni l'oxygène ni l'hydrogène n'attaquent les tuyaux A/C et ils résistent en plus aux attaques des bactéries et des racines de plantes.

Les tuyaux A/C sont différents de ceux en métal et en béton, en ce sens que la corrosion s'y effectue peu à peu et ramollit seulement la structure sur une mince couche de surface de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres de profondeur [Huenerberg et Tessendorff (6), Quint (11), Eick (19)]. Étant donné que la masse du béton en vrac est perméable, les agents de corrosion peuvent se diffuser dans toute sa structure qui est, par conséquent, plus susceptible à la dégradation que celle de l'A/C. On sait que les

Tableau 2-6 - Effet des produits chimiques d'utilisation courante sur le béton (35)

Vitesse d'attaque à la température ambiante	Acides inorganiques	Acides organiques	Solutions alkalines	Solutions de sel	Divers
Rapide	Chlorhydrique Fluorhydrique Nitrique Sulfurique	Acétique Formique Lactique	-	chlorure d'aluminium	-
Modérée	Phosphorique	Tannique	Hydroxyde de sodium >20 %*	Nitrate d'ammonium Sulfate d'ammonium Sulfate de sodium Sulfate de magnésium Sulfate de calcium	Brome (gaz) Liqueur de sulfite
Lente	Carbonique	-	Hydroxyde de sodium 10-20 %* Hypochlorite de sodium	Chlorure d'ammonium Chlorure de magnésium Cyanure de sodium	Chlore (gaz) Eau de mer Eau douce
Négligeable	-	Oxalique Tartrique	Hydroxyde de sodium <10 %* Hypochlorite de sodium Hydroxyde d'ammonium	Chlorure de calcium Chlorure de sodium Nitrate de zinc Chromate de sodium	Ammoniaque (liquide)

* Éviter les agrégats siliceux car ils sont attaqués par des solutions concentrées d'hydroxyde de sodium

produits de dégradation du béton ne sont pas nuisibles à l'homme bien que cela soit encore douteux en ce qui concerne l'A/C. Eick fait remarquer que les fibres d'amiante dans la structure des tuyaux A/C résistent à pratiquement tous les phénomènes de corrosion (19). Huenerberg et Tessendorff (6) déclarent qu'en présence de bases, le chrysotile donne des produits qui résistent à l'attaque chimique; toutefois, Riedel et ses collaborateurs ont trouvé, par mesures des propriétés des fibres d'amiante, qu'après un an d'exposition dans une solution saturée d'hydroxyde de calcium (pH 12,48), leur résistance à la traction diminuait de 43,4 %, leur module d'élasticité décrois-

sait d'environ 34 % et l'élongation à la rupture était réduite de 13,2 % (la précision de ces dernières données est faible) (37).

Barbakadze et ses collaborateurs ont signalé que la corrosion des fibres d'amiante dans des milieux acides commence à un pH inférieur à <3 (38). Opoczky et Pentek ont trouvé que du magnésium peut être lentement extrait du chrysotile, tout au moins au cours de l'exposition à l'atmosphère (39). Les efforts visant la compréhension des mécanismes de corrosion de la matrice A/C se sont toujours concentrés sur le constituant de ciment; par conséquent, les connaissances disponibles au sujet des structures à base de ciment peuvent être appliquées, ou tout au moins utilisées, comme base du travail pour l'A/C. De nombreux facteurs influencent la corrosion, quel qu'en soit le mécanisme individuel, mais les plus importants sont (6,19,28): le genre d'agent de corrosion; la concentration de l'agent de corrosion; la durée de son action; et les conditions de convection dans le milieu de réaction. Les autres facteurs sont: le volume du fluide transporté; la vitesse du fluide transporté; la température; la teneur en eau (pour l'ionisation et la migration); la solubilité du produit de réaction; la composition de la couche superficielle de protection du matériau.

2.3.1 Dissolution des constituants

La dissolution est le plus simple des types de mécanisme de corrosion et un certain nombre de constituants des A/C y sont sujets. Le facteur régissant ce mécanisme est le produit de solubilité qui est une constante pour chaque composé donné, dans des conditions données et à une température particulière. Dans le cas du carbonate de calcium,

$$K_{SO} = \left\{ Ca^{2+} \right\} \left\{ CO_3^{2-} \right\}$$

La notation thermodynamique avec les crochets représente les activités ioniques qui peuvent être considérées comme représentant une concentration idéalisée. Cette dernière est souvent utilisée pour des approximations, mais dans ce cas, il est nécessaire d'exprimer les activités réelles avec des coefficients supplémentaires.

Lorsque le produit ionique d'un composé donné dépasse la valeur de K_{SO}, il y aura précipitation de ce produit; lorsqu'il est inférieur à K_{SO}, le composé se dissoudra et ce n'est que lorsque le produit ionique est égal au produit de solubilité que le système sera en équilibre. Il est évident que dans les systèmes naturels complexes cette dernière condition est rarement, si jamais, atteinte.

La chaux libre est le constituant le plus soluble de la pâte A/C. Son rôle a été bien documenté en ce qui concerne la durabilité des matrices à base de ciment (26). La solubilité du carbonate de calcium dans l'eau, des silicates de calcium hydratés, est bien connue aussi et, dans une certaine mesure, c'est aussi le cas pour celle de l'alumine (fig. 2-1) (3). Toutefois, tous les constituants peuvent être solubles, même si ce n'est que dans une mesure infime. Dans un système évalué du point de vue strictement thermodynamique, cela doit être pris en considération.

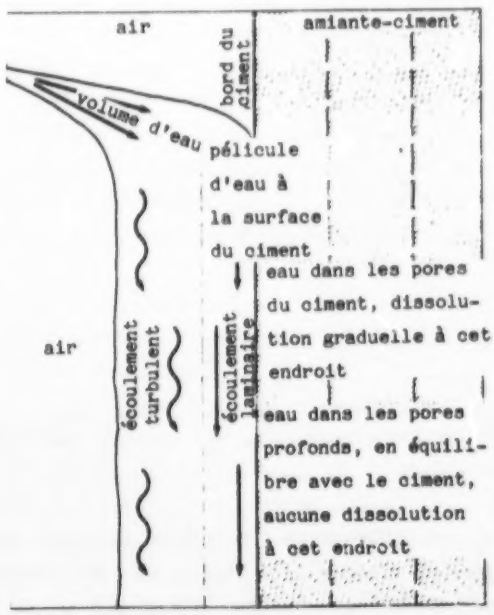


Fig. 2-1 - Dissolution des composés du calcium dans l'eau. Écoulement de l'eau sur de l'amiante-ciment. L'eau est légèrement sous-saturée au titre du carbonate de calcium (3).

2.3.2 Réactions donnant lieu à des produits solubles

Les réactions de ce genre qui sont les mieux connues sont celles avec l'ion hydrogène qui provient d'habitude de divers acides. Il est nécessaire de faire la différence entre les facteurs d'intensité, exprimés sous forme de pH, et la capacité de l'acide de neutraliser une base, qui est déterminée uniquement par titrimétrie.

Étant donné les actions tampons des solutions, il est possible qu'un acide faible, mais de pH plus élevé, soit corrosif pendant une longue durée à cause du remplacement constant de l'acide dépensé à partir d'un réservoir important de $[H^+]$, tandis qu'un acide relativement fort peut être moins corrosif. Certains acides organiques qui sont communément présents dans les sols, réagissent souvent de cette façon.

Dans l'étude du CEOCOR, les sources d'acidité ont été énumérées comme suit (28):

- eaux hydrothermales, activité volcanique
- acides humiques, provenant de la décomposition biologique de la végétation
- certaines bactéries (section 2.3.4)
- eaux industrielles, remblais de décombres et de déchets
- pollution industrielle avec une forte teneur en anhydride sulfureux qui produit la pluie acide.

Les acides réagissent avec les constituants de la couche de surface du tuyau A/C et, en fonction de la profondeur du ramollissement, il y a modification des propriétés physiques et chimiques. La structure s'affaiblit et peut éventuellement se décomposer, mais il n'y a aucune expansion de matériau.

La solubilité des produits de réaction a une très grande influence sur la vitesse de corrosion. Eick a montré (fig. 2-2) qu'un acide donnant lieu à un produit insoluble, comme le sulfate de calcium, corrodera beaucoup moins l'A/C qu'un acide donnant lieu à un produit complètement soluble comme le chlorure de calcium (19). Dans ce dernier cas, il sera même moins destructif qu'un tampon à pH considérablement plus élevé. La raison de cet état de choses est que le gypse de la couche de protection formée dans la partie

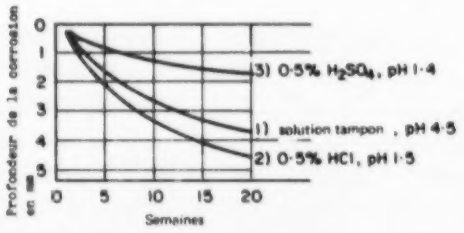


Fig. 2-2 - Influence du temps de contact sur la profondeur de corrosion (19)

superficielle du tuyau A/C diminue la vitesse de corrosion par l'acide sulfurique étant donné que l'agent corrosif passe de la convection à la diffusion. À des stades ultérieurs, le gypse commence à se décomposer. De nombreux acides organiques des sols, qui forment des sels difficilement solubles, agissent d'une façon similaire.

Les acides décomposent l'A/C à un pH inférieur à <6. L'ASTM donne des recommandation étendues en ce qui concerne l'acidité du sol, le mouvement de l'eau, la présence de sulfates et le pH admissible.

L'action de l'acide carbonique, un acide faible, produit une sorte de corrosion particulière. L'anhydride carbonique est produit principalement par la respiration et la photosynthèse ainsi qu'à partir des sources suivantes (28):

- gaz de fumée, gaz d'échappement de l'industrie chimique et de la circulation
- activité volcanique
- eaux hydrothermales
- décomposition bactérienne de la matière organique.

On a effectué maints travaux et déployé des efforts pendant des décennies pour essayer de comprendre les réactions de l'acide carbonique en général et son action corrosive en particulier. Lea a présenté ses interactions avec les matériaux à base de ciment (26). Toutefois, ce n'est que tout récemment que son rôle dans la nature a été élucidé de façon plus précise dans la discipline de la science aquatique. Stumm et Morgan ont décrit ces concepts (25). Les nouveaux concepts ont modifié de façon énergique notre compréhension actuelle du comportement de l'anhydride carbonique et ont éliminé les concepts tenaces, mais maintenant bien démodés, de l'acide carbonique "libre"

Tableau 2-7 - Observations critiques et possibilités de remplacement de la terminologie de Tillman en ce qui concerne l'équilibre calcium-acide carbonique (41)

$CaCO_3.aq + CO_2.aq = Ca(HCO_3)_2.aq$	Hypothèse de travail non prouvée du XIX siècle. Le ($CaCO_3$) solide est dissous de façon normale dans l'eau (en sa qualité d'électrolyte fort) produisant des ions Ca^{2+} et CO_3^{2-}. Les ions CO_3^{2-} sont sujets aux effets tampons de pH (fig. 3-2)
"Acide carbonique appartenant"	Pas un composé dans le sens chimique, "Concentration calculée à l'équilibre de l'acide carbonique libre" "CO_2 calculé - valeur requise"
"Acide carbonique excessif" "Acide carbonique déficient"	Pas un composé dans le sens chimique. "Écart de la concentration de CO_2 à l'équilibre" "Écart de l'acide carbonique libre par rapport à la valeur nominale" "Indicateur - Tillmans" "Indicateur - CO_2"
"Acide carbonique agressif" "Acide carbonique agressif de la chaux" "Acide carbonique agressif des métaux" "Acide carbonique empêchant la protection contre la rouille"	Terme sans contenu chimique ou physique.

et "agressif". Grohmann a résumé (tableau 2-7) les observations critiques et les substituts possibles à la terminologie antérieurement établie par Tillmans au sujet de l'équilibre calcium-acide carbonique (41).

2.3.3 Réaction donnant lieu à des produits d'expansion

L'expansion et la dégradation des matrices à base de ciment, par suite de l'interaction avec des sols et des eaux transportant des sulfates, ont fait l'objet de recherches et d'études amplement documentées. Non seulement sont-elles traitées dans les travaux classiques de Lea (26), l'ACI Manual (35), et les travaux de Huenerberg et Tessendorff (6), mais elles sont aussi signalées par Eick (19), Franquin (24) et incluses également dans l'étude du CEOCOR (28).

Mis à part la matière primaire, les sulfates proviennent de l'oxydation de l'anhydride sulfureux, SO_2, principalement des dépotoirs d'immondices, des eaux-vannes, des volcans, de l'activité industrielle et des gaz de combustion de toute sorte. La décharge de ce gaz dans l'atmosphère produit de la pluie acide. Les origines microbiologiques quant à elles sont décrites séparément dans la section 2.3.4.

Il n'y a aucun danger de corrosion interne des tuyaux A/C qui transportent de l'eau potable avec une concentration limite maximale de 250 ppm de sulfate. Toutefois, les choses se passent de façon tout à fait différente à la

surface extérieure, qui est quelquefois exposée à des sols très agressifs contenant des sulfates, et en particulier en ce qui concerne les tuyaux d'égouts, transportant des composés de soufre pouvant atteindre de très fortes concentrations. Les diverses autorités autorisent différents niveaux de sulfates, ce qui montre qu'il y a un désaccord au sujet de leur incidence. En général, les sulfates sont présents dans l'environnement. Dans des conditions favorables, ils se combinent en solution aux ions de calcium, provenant principalement de la chaux, pour former des sels expansibles: d'abord du gypse et ensuite de l'ettringite suivie d'aluminate tricalcique hydraté. La réaction a lieu dans un milieu neutre ou alcalin, entre 40 et 80°C, avec une forte augmentation en volume qui donne lieu à des pressions et perturbations internes. Le gypse commence par retarder l'avancement de la corrosion, mais à des stades ultèrieurs, des sulfo-aluminates monocalciques et tricalciques se forment.

Le mécanisme exact de la formation de ce sel fait encore l'objet de désaccords. Selon Franquin, le produit de la réaction peut être cristallin, formé à partir de la solution comme dans les ciments supersulfatés qui résistent à la fissuration, ou bien, il peut être une poudre réagissant comme un solide qui se dilate à cause de son volume (24). L'aluminate tricalcique se dissout seulement s'il y a une faible teneur en chaux libre dans la phase aqueuse.

Le sulfate de magnésium agit de façon disruptive étant donné ses réactions avec la chaux, les silicates de calcium hydratés, les aluminates et les sulfo-aluminates de calcium. La précipitation de l'hydroxyde de magnésium est favorisée tandis que du gypse est formé avec le calcium.

Comme l'a dit Franquin, le cas de l'eau de mer est intéressant parce qu'elle contient à la fois de fortes concentrations de sulfates et de magnésium (24). Toutefois, du chlorure est aussi présent en forte concentration, ce qui augmente la solubilité des autres sels et en particulier retarde la formation d'ettringite. Ce qui a pour résultat une corrosion plus faible que dans les eaux souterraines à teneur comparable en sulfates. La formation d'une surface à carbonate (à partir des carbonates en solution) agit comme une barrière pour empêcher la pénétration des sulfates et aussi pour empêcher le lessivage de la chaux de la matrice. Les micro-organismes qui y sont présents bloquent partiellement les pores et le dépôt supplémentaire d'hydroxyde de magnésium dans ces pores achève avec grand succès la formation d'une surface résistante.

Bien que ces réactions s'appliquent au béton, les tuyaux A/C, à structure encore plus dense, ont une tenue encore meilleure comme on l'a décrit pour le réseau de Gênes (2) et comme l'ont documenté Huenerberg et Tessendorff pour les réseaux transporteurs d'eau de mer (6).

2.3.4 Conversions microbiologiques du soufre

Le soufre est un élément des plus répandus dans la nature. Il joue un rôle important dans le biote où diverses bactéries, par l'intermédiaire du cycle du soufre, le transforment par divers moyens en un certain nombre de formes. Finalement, les agents de corrosion qui sont formés appartiennent aux deux catégories mentionnées auparavant: l'acide sulfurique et les sulfates. Ils peuvent attaquer les surfaces extérieures et intérieures des tuyaux. Une forme intermédiaire est celle de l'hydrogène sulfuré, gaz extrêmement toxique, explosif et odorant. Sa concentration en ions hydrogènes n'est pas suffisamment élevée pour qu'il agisse en tant qu'acide par lui-même, mais il est transformé davantage en produits corrosifs.

Dans le domaine microbiologique, un schéma généralisé de transformation a été établi. La figure 2-3 donne divers cheminements de réaction et les composés obtenus (42). La figure 2-4 donne un résumé qui comprend d'autres étapes.

La figure 2-5 (43), donne un schéma de l'action de l'hydrogène sulfuré et la figure 2-6 décrit une "niche" des bactéries oxydant le soufre (44). Le tableau 2-8 résume les conditions de formation de l'acide sulfurique (20).

La fourchette d'acidité dans laquelle les thiobacilli peuvent croître se présente comme suit:

Bactéries	pH
T. thiooxidans	2-4
T. ferrooxidans	2-4
T. thioparus	6-8
T. novellus	7-9

La formation d'hydrogène sulfuré à partir des composés organiques peut être aérobie ou anaérobie, selon le milieu, et les espèces croîtront en fonction de ces conditions. Les thiobacilli que l'on rencontre en particulier dans les égouts sont le *T. concretivorus* (20) et le *T. neapolitanus* (29).

Récemment, Koenig et Stoelting ont fait état de leur détermination par spectrométrie de masse et chromatographie en phase gazeuse (GC/MS)

Tableau 2-8 - Facteurs menant à la formation d'acide sulfurique dans les aires à niveau ouvert (20)

- Concentration de H_2S	:	>0,5 ppm dans l'espace de gaz
Seuil d'odeur	:	0,1 ppm
Concentration maximale admissible	:	10 ppm
- Présence de bactéries oxydantes H_2S (Thiobacillus concretivorus, multiplication optimale à ~28°C)		
- Condensat sur la paroi du tuyau à niveau ouvert (aucune transformation sur les parois du tuyau sec)		
- Aération déficiente des tuyaux à niveau ouvert (augmentation de la concentration de H_2S)		
- Les températures vont de 10 à 50°C; aux températures inférieures et supérieures à cette fourchette, on constate une diminution marquée de la vitesse d'oxydation; par conséquent les climats chauds avec peu d'eau de dilution présentent les conditions les plus favorables.		

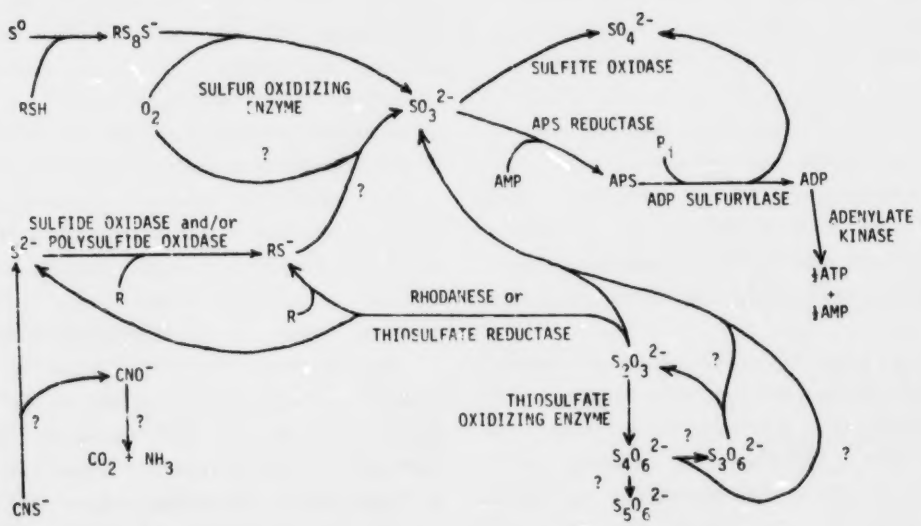


Fig. 2-3 - Schéma généralisé de l'oxydation du soufre élémentaire et des composés du soufre réduits par les thiobacilli (42)

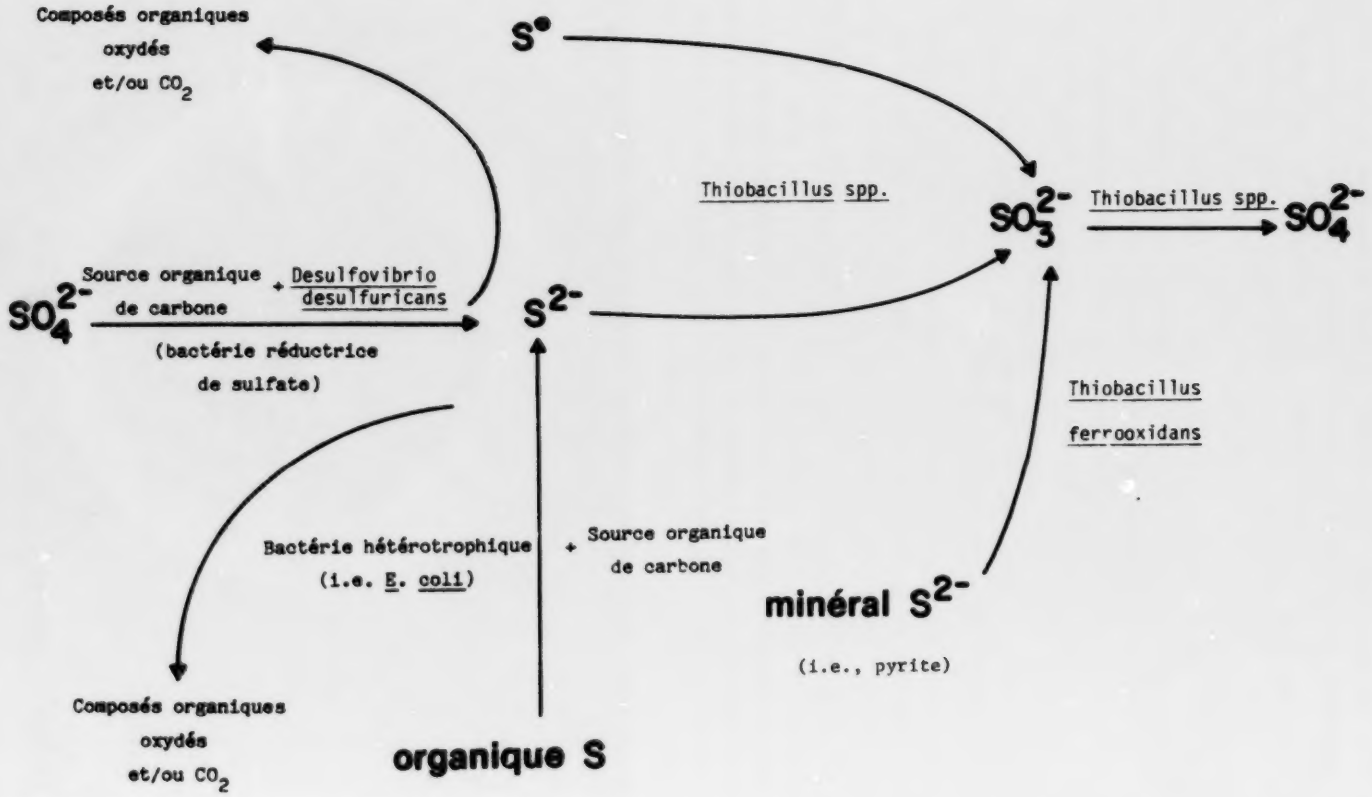


Fig. 1-4 - Sommaire des étapes de transformation microbiologique du soufre

Fig. 2-5 - Coupe d'un tuyau d'égout en béton soumis à des conditions corrosives types (43)

de composés présents dans les échantillons d'eaux usées hautement corrosives et de l'atmosphère sus-jacent (45). Avant l'analyse par GC/MS, ils ne détectaient l'hydrogène sulfuré ni par l'odorat (limite 1 x 10^{-3} mg/L) ni par l'essai très sensible à l'acétate de plomb. Les concentrations d'hydrogène sulphuré étaient inférieures à <1 mg/L. Contrairement à cet état de choses, une corrosion massive du béton par l'acide sulfurique était en cours et ils ont été capables d'identifier le trithiapentane (CH_3-S-S-S-CH_3) dans les eaux usées et le sulfure de diéthyle $(C_2H_5)_2S$ facilement volatilisé dans l'atmosphère. Ils proposent que les thiobacilli peuvent exister en présence de très faibles concentrations d'hydrogène sulfuré ou, alternativement, des micro-organismes peuvent métaboliser d'autres composés volatils du soufre. S'il s'agit bien du dernier cas, il faudra réexaminer le mécanisme d'acceptation générale en ce qui concerne la formation d'acide sulfurique à partir d'hydrogène sulfuré.

Les problèmes de corrosion liés aux égouts sont particulièrement graves dans les climats chauds (46).

2.3.5 Pression des sels de cristallisation

Dans les sols, la corrosion des tuyaux A/C, provoquée par la cristallisation des sels, a lieu sur les surfaces extérieures des tuyaux, dans des conditions cycliques de sécheresse et

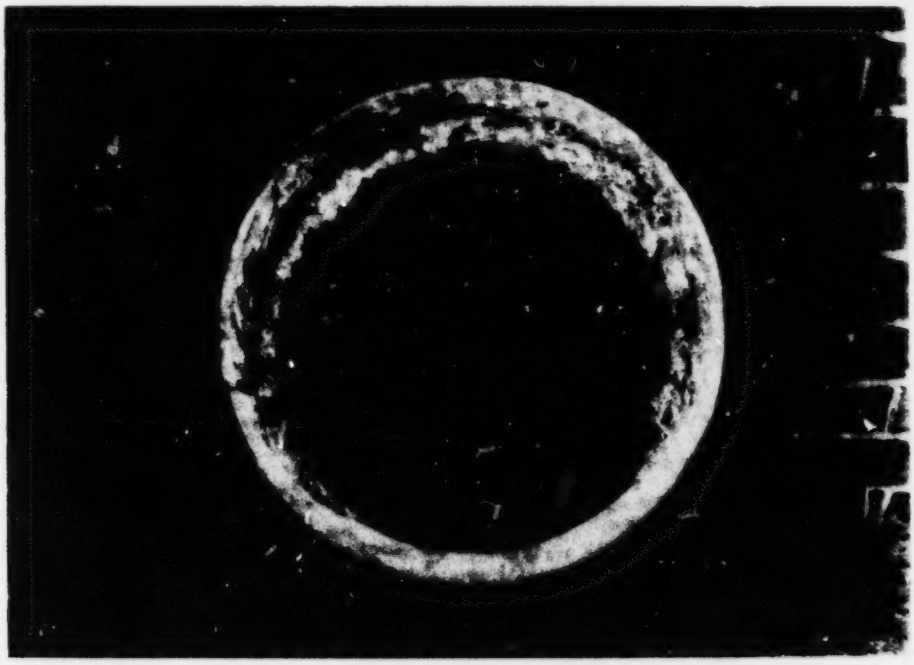


Fig. 2-6 - Formation d'une "niche sociale", à partir de fibres A/C, par les micro-organismes producteurs d'acide sulfurique (44)

d'humidité, et sur les surfaces internes en fonction de la variation du niveau du fluide transporté. Les cristaux des divers sels, par exemple, les sulfates et carbonates alcalins, se cristallisent dans les pores de la structure au cours de l'évaporation ou de la migration de l'eau et perturbent mécaniquement la matrice du tuyau. Les sels de potassium ont une faible tension superficielle et sont particulièrement sujets au grimpage.

On considère que les conditions cycliques de sécheresse et d'humidité à la surface de la mer sont les plus dures de la nature. Par conséquent, l'essai de la corrosion à long terme est souvent effectué sur le terrain littoral pour établir la durabilité des matériaux; étant donné que sa surface est lisse et dense, et que sa structure est de faible porosité, l'amiante-ciment est moins sujet à ce mécanisme de corrosion que le béton (6).

3. EXPLICATION THÉORIQUE DE LA CORROSION DES TUYAUX EN AMIANTE-CIMENT

3.1 LE pH EN TANT QUE VARIABLE PRINCIPALE - RÔLE DE L'ANHYDRIDE CARBONIQUE - RÔLE DU CALCIUM

Le but principal du travail sur la corrosion est de l'empêcher ou de la contrôler. Ce n'est guère possible sans en comprendre toute la complexité. Comme tous les phénomènes de corrosion, celle des tuyaux A/C est essentiellement liée aux caractéristiques des eaux provoquant la détérioration.

Stumm et Morgan ont montré dans leur exposé sur la chimie de l'eau que nous devons traiter le comportement d'un système d'une complexité aussi énorme que celui de la terre, d'une façon strictement théorique (25). La science qui nous est le plus utile à cet égard est la thermodynamique chimique étant donné que le système "terre" se comporte en fonction des lois physico-chimiques établies. L'interaction, la dissolution et le dépôt de matière sur la terre suivent les cycles climatiques des roches associées à l'eau, comme l'indique la figure 3-1 (25). Les acides transportés par l'eau depuis l'intérieur de la terre, agissent sur les bases à la surface de la terre et provoquent une météorisation continuelle des roches. La biosphère est aussi engagée dans ce processus, par l'intermédiaire de ses nombreux cycles comme ceux du carbone, du soufre, de l'azote et du phosphore. Toute la vie biologique, et même le processus de météorisation, est régie par l'activité de l'ion hydrogène (H^+); par conséquent, le pH des eaux est une variable principale dans les réactions organiques et inorganiques.

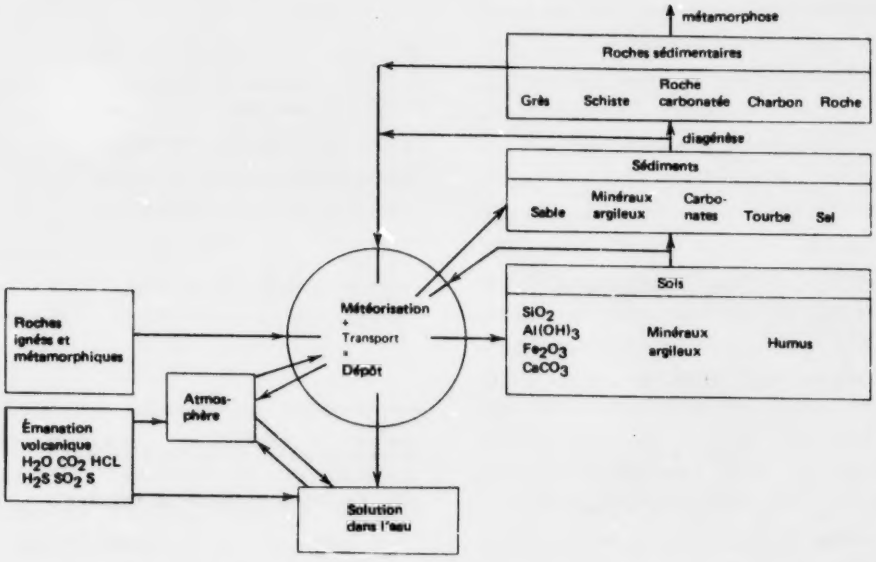


Fig. 3-1 - Interaction du cycle des roches avec celui de l'eau (25)

Ce raisonnement suit la théorie bien établie maintenant de Brønsted qui classe les acides comme donneurs de protons et les bases comme accepteurs de protons. L'eau possède la capacité d'auto-ionisation (auto-protolyse):

$$H_2O + H_2O = H_3O^+ + OH^-$$

et est par conséquent une source inépuisable de protons. Dans une solution aqueuse diluée $(H_2O) = 1$ et l'équilibre constant de la réaction, appelé d'habitude produit ionique de l'eau, se présente comme suit:

$$K_w = (OH^-)\ (H_3O^+) = (OH^-)\ (H^+)$$

À 25°C, $K_w = 1{,}008 \times 10^{-14}$ et le pH = 7,00, correspond à la neutralité exacte dans l'eau pure où $[H^+] = [OH^-]$. K_w varie en fonction de la température.

Le facteur qui régit la concentration des protons est l'anhydride carbonique quel qu'en soit la source. Toutefois, pour qu'il puisse réagir, la présence d'ions de calcium est nécessaire, comme le montre le tableau 3-1 (41). Le carbonate de calcium est abondant dans la nature; sa dissolution ou sa précipitation, en fonction de son produit de solubilité, régit les interactions car les concentrations d'ions fondamentaux ne sont pas arbitraires.

Le changement fondamental de notre compréhension, important en particulier pour le contrôle de l'eau potable et de ce fait ayant une influence sur la corrosion des tuyaux A/C, est la stricte application du produit de solubilité du carbonate de calcium et la compréhension de sa dissolution par l'anhydride carbonique. Pendant des décennies, cette réaction a été interprétée comme suit:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow CA(HCO_3)_2$$

Tableau 3-1 - Schéma d'interaction entre le carbonate de calcium solide, les ions Ca^{2+}, CO_3^{2-}, HCO_3^- et l'acide carbonique libre (41)

$(CaCO_3)$ solide $\overset{H_2O}{\rightleftharpoons}$ Ca^{2+} + $CO_3^=$	Provient de minéraux et de produits chimiques contenant du Ca, par exemple calcite, dolomite, gypse, lait de chaux, eau de chaux.
H_3O^+ ⇅ HCO_3^- + H_2O	Provient des minéraux et de produits chimiques contenant C, par exemple, scorie de soude, calcite, dolomite, magnésite,
$(CO_3^{2-} \rightleftharpoons HCO_3^- + OH^-)$	carbonate acide de sodium.
H_3O^+ ⇅ H_2CO_3 + H_2O	Provient de l'atmosphère et du
$(HCO_3^- \rightleftharpoons H_2CO_3 + OH^-)$	CO_2 de conversion de la matière.
$H_2CO_3 \rightleftharpoons CO_2$. aq	

Tableau 3-2 - Relation d'équilibre des ions fondamentaux (31)

$H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$	$K_w = (H^+)(OH^-)$	(0)
$H_2O + CO_2 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$	$K_1 = \frac{(H^+)(HCO_3^-)}{(CO_2)(H_2O)}$	(1)
$HCO_3^- \rightleftharpoons H^+ + CO_3^{=}$	$K_2 = \frac{(H^+)(CO_3^{=})}{(HCO_3^-)}$	(2)
$CaCO_3 \rightleftharpoons Ca^{2+} + CO_3^{=}$	$K_s = (Ca^{2+})(CO_3^{=})$	(3)
$(CO_2)_T = (CO_2) + (HCO_3^-) + (CO_3^{=})$		(4)
$2(Ca^{2+}) + (H^+) = (OH^-) + (HCO_3^-) + 2(CO_3^{=})$		(5)

cette formule n'est plus valable aujourd'hui. Selon l'interprétation acceptée aujourd'hui, le carbonate de calcium se dissout directement (comme le fait un composé ionique) et sa solubilité dépend du produit de solubilité (équation 3 du tableau 3-2).

Cette différence a résolu toutes les difficultés au niveau du concept de l'anhydride carbonique agressif, libre, lié, etc., comme donné au tableau 2-7. Tous les diagrammes et indices établis auparavant pour sa mesure ont été rendus désuets, comme Neveux (23) ainsi qu'Anderson et Stone (3), respectivement, l'ont décrit.

En supplément à l'auto-protolyse de l'eau, il y a d'autres sources de protons:

dissociation des acides forts	$HCl + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + Cl^-$
dissociation des acides faibles, par exemple: acide carbonique	$H_2CO_3 + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + HCO_3^-$

Les réactions biologiques exercent une forte influence sur le pH. En général, l'oxygénation le réduit et la réduction par les sulfates, ainsi que la dénitrification, l'augmente, comme on peut le voir dans la section 2.3.4.

Toutes les réactions dans tous les systèmes, indépendamment de leur complexité, se passent sur la base des lois physico-chimiques générales qui contrôlent:

- l'équilibre des protons (électroneutralité)
- l'action des masses,
- les produits de solubilité de tous les composés en présence, et
- le produit ionique de l'eau.

Pour résoudre l'équation d'équilibre des protons, il faut qu'il y ait autant d'équations qu'il y a d'interactions.

Halleux et Bhatnagar ont présenté les relations d'équilibre des ions fondamentaux (tableau 3-2) (31). Leur évaluation dépend de la disponibilité des constantes nécessaires et des déterminations analytiques des solutions. Le tableau 2-3 donne un exemple des données qui sont nécessaires.

Ces changements fondamentaux de nos connaissances ont contribué de façon décisive à la compréhension théorique de la corrosion des tuyaux A/C comme l'ont signalé récemment Schock et Buelow (5). En effet, pour leur modélisation par ordinateur des indices de saturation et des diagrammes de précipitation, mise au point à titre de nouvel outil pour suivre le cheminement des équilibres chimiques dans les systèmes complexes, ils ont utilisé les réactions aqueuses données au tableau 3-3 et les réactions à l'état solide données au tableau 3-4. À partir de cette modélisation et des travaux effectués concurremment dans des installations pilotes et sur le terrain, ils ont conclu que le tuyau A/C était un

Tableau 3-3 - Réactions aqueuses prises en considération pour l'établissement de l'indice de saturation (IS) et des diagrammes de précipitation (5)

Réaction	log K†	Source
Hydrogène		
$H^+ + OH^- = H_2O$	14,00	1
$2H^+ + CO_3^{2-} = H_2CO_3$*	16,7	2
$H^+ + CO_3^{2-} = HCO_3^-$	10,3	3
$2H^+ + CO_3^{2-} = CO_2(g) + H_2O$	18,14	2
$H^+ + PO_4^{3-} = HPO_4^{2-}$	12,4	4
$2H^+ + PO_4^{3-} = H_2PO_4^-$	19,6	4
$3H^+ + PO_4^{3-} = H_3PO_4^o$	21,7	4
Calcium		
$Ca^{2+} + H_2O = CaOH^+ + H^+$	-12,6	5
$Ca^{2+} + CO_3^{2-} = CaCO_3^o$	3,2	5
$Ca^{2+} + CO_3^{2-} + H^+ = CaHCO_3^+$	11,3	5
$Ca^{2+} + H^+ + PO_4^{3-} = CaHPO_4^o$	15,1	5
$Ca^{2+} + 2H^+ + PO_4^{3-} = CaH_2PO_4^+$	20,3	5
$Ca^{2+} + PO_4^{3-} = CaPO_4^-$	6,5	5
Magnésium		
$Mg^{2+} + H_2O = MgOH^+ + H^+$	-11,8	5
$Mg^{2+} + CO_3^2 = MgCO_3^o$	3,0	5
$Mg^{2+} + CO_3^{2-} + H^+ = MgHCO_3^+$	11,4	5
$Mg^{2+} + H^+ + PO_4^{3-} = MgHPO_4^o$	15,3	5
Sodium		
$Na^+ + CO_3^{2-} = NaCO_3^-$	1,2	5
Zinc		
$2Zn^{2+} + H_2O = Zn_2OH^{3+} + H^+$	-9,0	1
$Zn^{2+} + H_2O = ZnOH^+ + H^+$	-9,0	1
$Zn^{2+} + 2H_2O = Zn(OH)_2^o + 2H^+$	-16,9	1
$Zn^{2+} + 3H_2O = Zn(OH)_3^- + 3H^+$	-28,4	1
$Zn^{2+} + 4H_2O = Zn(OH)_4^{2-} + 4H^+$	-41,2	1
$Zn^{2+} + H^+ + PO_4^{3-} = ZnHPO_4^o$	15,6	4
$Zn^{2+} + 2H^+ + PO_4^{3-} = ZnH_2PO_4^+$	21,2	4
$Zn^{2+} + CO_3^{2-} = ZnCO_3^o$	4,8*	6
$Zn^{2+} + H_2O + Cl^- = ZnClOH^o + H^+$	-7,5	7
$Zn^{2+} + Cl^- = ZnCl^+$	0,4	4
$Zn^{2+} + 2Cl^- = ZnCl_2^o$	0,6	4
$Zn^{2+} + 3Cl^- = ZnCl_3^-$	0,5	4
$Zn^{2+} + 4Cl^- = ZnCl_4^{2-}$	0,2	4
Fer		
$Fe^{3+} + H_2O = FeOH^{2+} + H^+$	-2,2	1
$Fe^{3+} + 2H_2O = Fe(OH)_2^+ + 2H^+$	-5,7	1
$Fe^{3+} + 3H_2O = Fe(OH)_3^o + 3H^+$	-13,6	1
$Fe^{3+} + 4H_2O = Fe(OH)_4^- + 4H^+$	-21,6	1
$2Fe^{3+} + 2H_2O = Fe_2(OH)_2^{2+} + 2H^+$	-3,0	1
$3Fe^{3+} + 4H_2O = Fe_3(OH)_4^{5+} + 4H^+$	-6,3	1
$Fe^{3+} + H^+ + PO_4^{3-} = FeHPO_4^+$	17,8	5
$Fe^3_+ + Cl^- = FeCl^{2+}$	1,4	5
$Fe^{3+} + 2Cl^- = FeCl_2^+$	2,1	5
$Fe^{3+} + 3Cl^- = FeCl_3^o$	1,1	5

Tableau 3-3 - suite

†Toutes les données se rapportent à une température de 25°C. *Les données publiées par Bilinski et ses collaborateurs ont été réinterprétées par Schock et ses collaborateurs tant en ce qui concerne $ZnCO_3^o$ et $Zn(CO_3)_2^{2-}$ avec log K = 5,2 pour $ZnCO_3^o$ et avec log K = 7,5 pour la réaction: $Zn^{2-} + 2CO_3^{2-} = Zn(CO_3)_2^{2-}$. Ces constantes ont été incorporées dans le modèle après l'exécution des calculs.

Tableau 3-4 - Réactions à l'état solide prises en considération pour l'établissement du diagramme de l'indice de saturation (5)

Réaction	log K†	Source
Calcium		
$Ca^{2+} + CO_3^{2-} = CaCO_3(s)$	8,5	1
$Ca^{2+} + 2H_2O = Ca(OH)_2(s) + 2H^+$	-22,8	2
$Ca^{2+} + H^+ + PO_4^{3-} + 2H_2O = CaHPO_4.2H_2O(s)$	18,9	3
$8Ca^{2+} + 6PO_4^{3-} + 2H^+ + 3H_2O = Ca_4H(PO_4)_3.3H_2O$	46,9	3
$5Ca^{2+} + 3PO_4^{3-} + H_2O = Ca_5(PO_4)_3OH(s) + H^+$	40,6	4
Magnésium		
$Mg^{2+} + CO_3^{2-} = MgCO_3(s)$	7,5	5
$Mg^{2+} + 2H_2O = Mg(OH)_2(s) + 2H^+$	-16,8	7
$3Mg^{2+} + 2PO_4^{3-} + 8H^+ = Mg_3(PO_4)_2.8H_2O(s)$	25,2	2
Zinc		
$Zn^{2+} + CO_3^{2-} = ZnCO_3(s)$	10,8	6
$5Zn^{2+} + 2CO_3^{2-} + 6H_2O = Zn_5(OH)_6(CO_3)_2(s) + 6H^+$	-9,7	6
$Zn^{2+} + 2H_2O = Zn(OH)_2(s) + 2H^+$	-12,5	7
$3Zn^{2+} + 2PO_4^{3-} + 4H_2O = Zn_3(PO_4)_2.4H_2O(s)$	35,3	8
Fer III		
$Fe^{3+} + 3H_2O = Fe(OH)_3(s) + 3H^+$	-4,9	5
$Fe^{3+} + PO_4^{3-} + 2H_2O = FePO_4.2H_2O(s)$	26,4	2

produit sûr et durable si l'on maintient les impératifs de la qualité de l'eau qui sont fondés sur la complexité de son comportement chimique. Si l'eau transportée est sous-saturée en calcium, les constituants du calcium présents dans le tuyau seront utilisés pour rétablir l'équilibre, menant ainsi à une détérioration du tuyau. Les remèdes proposés comprennent le dépôt de pellicules de protection provenant de composés du zinc ajoutés à l'eau transportée. Des pellicules similaires ont quelquefois été observées dans les réseaux existants, même avec de l'eau agressive, mais ils ne sont pas efficaces sur des tuyaux déjà considérablement dégradés. L'indice d'agressivité utilisé couramment pour l'évaluation de la qualité corrosive de l'eau n'est pas une mesure fiable, si l'on s'en tient aux bases théoriques. Les nouveaux points de vue théoriques et les outils qui en découlent sont aussi directement applicables à d'autres tuyaux que ceux en amiante-ciment, notamment ceux en béton.

4. CONTRÔLE ET AMÉLIORATIONS DE LA PRÉVENTION DE LA CORROSION DES TUYAUX EN AMIANTE-CIMENT

Lorsqu'ils ont été utilisés pour la première fois, on s'est rendu compte que les tuyaux A/C sont potentiellement sujets à corrosion. Si le pH du milieu en contact tombe au-dessous de <6, il faut prêter attention à son contrôle et à l'application de mesures de prévention de la

corrosion. Quelquefois ces mesures sont désignées comme étant passives ou actives, ou comme étant externes ou internes. Elles sont classées comme étant liées au tuyau A/C, au fluide transporté et à l'environnement extérieur.

4.1 CONTRÔLE DE LA TECHNOLOGIE DES TUYAUX EN AMIANTE-CIMENT

L'effet de la matrice A/C, les paramètres de conception du tuyau, les revêtements de protection et l'utilisation des bactéricides sont examinés.

4.1.1 Modifications de la matrice amiante-ciment

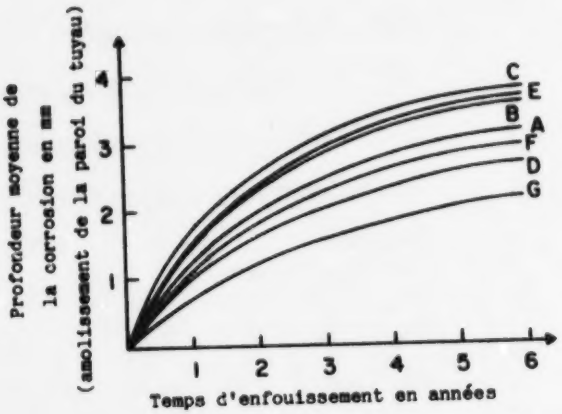
Dans cette catégorie, on traite de la composition du ciment utilisé, du composite A/C et du processus de mûrissement.

4.1.1.1 *Composition du ciment*

Des essais rigoureux en laboratoire et sur le terrain des tuyaux en amiante-ciment fabriqués avec du ciment à forte teneur en alumine (high alumina cement: HAC) ont prouvé que leur résistance à la corrosion est supérieure à celle des tuyaux fabriqués avec tout autre ciment.

En ce qui concerne l'eau potable, Eick (20) a signalé les résultats, indiqués dans la figure 4-1, des essais sur des tuyaux avec différentes sortes de ciments sous des conditions très agressives d'acide carbonique. Les tuyaux fabriqués avec HAC ont eu le meilleur rendement et ce dernier a été suivi de tuyaux fabriqués avec du ciment de laitier de haut fourneau. Les tuyaux en ciment Portland normal et durci en autoclave ont eu un rendement inférieur et deux tuyaux fabriqués à partir de ciment exempt de C_3A ont eu la pire des performances; leurs résultats chevauchaient ceux du ciment Portland-fer. La vitesse de corrosion de tous les tuyaux tombait avec le temps. En aucun cas, la couche molle ne dépassait 4 mm ce qui indique que la densité des tuyaux A/C a plus d'effet que la catégorie de ciment utilisée.

Crennan et ses collaborateurs ont fait état d'un excellent rendement de tuyaux d'égout expérimentaux fabriqués avec HAC (29). Plusieurs sortes de ciments ont été soumises à des essais dans les égouts pendant 5 à 8 ans. Des essais étendus en laboratoire et dans des installations pilotes ont évalué la résistance au sulfate neutre, à l'acide sulfurique et à l'hydrogène sulfuré gazeux. On a obtenu une augmentation



Components	A	B	C	D	E	F	G
CaO	65.12	63.28	62.63				37.7
SiO_2	21.46	21.15	21.61				2.8
Al_2O_3	5.52	4.10	4.00				40.8
Fe_2O_3	2.12	6.39	6.70				18.0
MgO	0.76	0.99	0.95				0.5
SO_3	2.50	1.85	2.42				0.03
Ignit.loss	1.70	1.58	1.28	A + 70% blast furnace slag	A + 30% blast furnace slag	A + 40% quartz flour	-
Insol.	0.14	0.12	0.11				0.1
C_3S	60	60	54	-	-	-	-
C_2S	15	16	22	-	-	-	-
C_3A	11	-	-	-	-	-	-
C_4AF	6	19	20	-	-	-	-
Blast furnace slag	0	0	0	70	30	0	0

Cement analysis

A: Normal portland cement
B: C_3A-free portland cement
C: C_3A-free portland cement
D: Blast furnace cement
E: Iron portland cement
F: A + SiO_2 steam-cured
G: Fused alumina cement

Fig. 4-1 - Corrosion par les eaux acides - après un écoulement de 6 ans dans des tuyaux non protégés.

quintuple de la durée en regard des tuyaux autoclavés fabriqués avec du ciment Portland ordinaire (ordinary Portland cement: OPC). La durée des tuyaux A/C fabriqués avec du ciment au supersul-

fate était de 2 à 3 fois plus longue tandis que celle des tuyaux fabriqués avec le ciment Portland ordinaire était deux fois plus longue que la durée des tuyaux en béton équivalents. Aucune silice n'a été utilisée dans les formules HAC.

Pour la résistance aux sulfates, Huenerberg et Tessendorff (6) ainsi que l'étude du CEOCOR (28) ont suggéré auparavant l'utilisation de ciment avec moins de 3 % de C_3A ou contenant 70 % de laitier de haut fourneau. À partir d'essais statiques d'exposition en laboratoire, Barbakadze et ses collaborateurs en ont conclu que le meilleur rendement des tuyaux A/C est obtenu avec des ciments à faible teneur en C_3S ne dépassant pas 50 à 52 % (tableau 4-1);

Tableau 4-1 - Caractéristiques des ciments de départ et propriétés des échantillons A/C (38)

Cimenterie	Composition Minéralogique des ciments en %				R à la flexion kg/cm^2	W % (abs. d'eau)	γ (masse volumique) g/cm^3
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF			
Zdolbunovskii	59	19	7	13	307	20,2	1,76
Bekhabatskii	53	23	6	13	300	21,7	1,72
Akhangaranskii	48	27	4	16	298	19,2	1,83

Tableau 4-2 - Composition de phase des clinkers, % (47)

Indice de l'échantillon de clinker	Résultats de l'analyse							
	Chimique				par rayons X			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF+ phase vitreuse	alite	Belite de β-C_2S	C_3A + +NC_3A_3	C_4AF
37-1	60	14	5	16	61	16	3,3	16
37-2	57	16	8	14	58	16	5	13,3
37-A-1	52	24	6	15	50	25	3,3	15,4
37-A-2	50	26	9	13	50	25	6,3	13,4
ChTsZ-1	57	14	5	16	57	15	5	16
ChTsZ-2	44	27	8	14	46	25	8,6	15

Tableau 4-3 - Propriétés de filtration des mélanges de ciment et A/C (47)

Indice de l'échantillon de clinker	Ciment			Ciment + amiante		
	Volume de l'eau separée, cm^3	R compression MPa	Masse volumique g/cm^3	Volume de l'eau séparée, cm^3	R compression MPa	Masse volumique g/cm^3
37-1	1	2,2	2	7,7	3,53	1,7
37-2	0,9	2	1,9	4,5	3,03	1,5
37-A-1	1,2	2,1	2	7,7	4,24	1,6
37-A-2	1,0	1,6	1,9	4	2,83	1,5
ChTsZ-1	1,4	2,5	2,1	7,2	4,16	1,7
ChTsZ-2	1,0	2	1,9	4,5	2,4	1,5

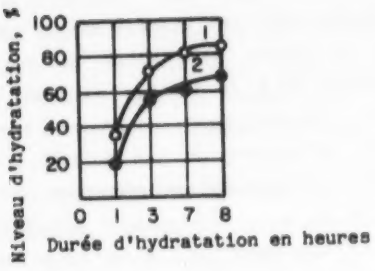


Fig. 4-2 - Niveau d'hydratation des ciments à partir de données d'analyse par rayons X:
(1) ciment à clinker, calciné en atmosphère oxydante;
(2) même ciment, en atmosphère réductrice (47)

ils avaient aussi la plus forte teneur en C_4AF (38). Ces ciments ont produit des échantillons de la plus forte densité, de la plus faible absorption d'eau et de résistance comparable.

Kuznetsova a étudié l'influence des atmosphères réductrices ou oxydantes pendant la calcination du ciment (47). Elle en a conclu que les ciments produits dans une atmosphère réductrice (tableau 4-2), ont une plus faible vitesse d'hydratation étant donné que la microstructure est faible (fig. 4-2). Ils ont aussi une plus faible capacité de filtration pour le ciment et l'A/C (tableau 4-3), menant à une plus forte rétention d'eau qui à son tour ralentit le compactage des couches A/C. Finalement, une forte teneur en C_3A réduit la résistance à cause de la recristallisation de l'aluminate. Les modifications de phase du ciment sont particulièrement accentuées quand les produits A/C sont chauffés.

4.1.1.2 *Composite d'amiante-ciment*

La théorie moderne du béton renforcé aux fibres (fibre-reinforced concrete: FRC) a permis une meilleure compréhension du composite A/C. Hannant (48) a décrit, entre autres, l'amiante-ciment et de Mahieu (49) a présenté un traitement hautement mathématique de la théorie moins connue fondée sur l'expérience de production. Par conséquent, le développement phénoménologique long et difficile de l'A/C est achevé maintenant avec l'explication, en rétrospective, du fondement théorique du rendement de l'A/C, conduisant tous à une utilisation pratique améliorée.

Krenchel a examiné les mises au point de FRC (Walton, 50), et en a conclu que les perspectives escomptées de production en série ne se sont pas concrétisées, partiellement parce que le rendement des fibres d'amiante ne peut pas encore être remplacé. Auparavant, Krenchel a énuméré six caractéristiques d'un FRC qui aurait du succès (51):

1. haute teneur en fibre
2. fibres ductiles
3. fibres minces
4. répartition uniforme des fibres
5. pour l'orientation 2-d (maximum 1/d)
6. pour l'orientation 3-d (optimum 1/d)

Il est très difficile d'obtenir une répartition uniforme avec des fibres autres que celles de l'amiante étant donné qu'elles ne peuvent pas fournir la même flottabilité au ciment. Une comparaison des exigences théoriques des fibres de FRC, précisées par Riedel et ses collaborateurs et données ci-après, montre qu'une répartition uniforme des fibres d'amiante dans la matrice est l'avantage le plus important du composite A/C (37).

Les exigences générales des fibres pour une interaction correcte avec la pâte de ciment sont (37):

- une résistance à la traction plus élevée que celle du liant,
- un module d'élasticité supérieur ou égal à celui du liant,
- une faible élongation permanente de la fibre,
- une élongation à la rupture supérieure ou égale à celle du liant,
- une bonne cohésion de la fibre à la pâte de ciment en fonction de: rapport d'aspect, composition chimico-minéralogique, profondeur d'ancrage, résistance au cisaillement de la fibre,
- absence de réaction avec l'eau et le liant,
- une bonne capacité d'adhérence du ciment aux fibres,
- bonne dispersion dans la suspension de ciment,
- aucune désintégration des fibres en cours de préparation
- pertinence hygiénique et environnementale.

Fig. 4-3 - Effet de la densité sur la résistance à la corrosion des matériaux liés au ciment (par exemple dans le cas de l'attaque par les sulfates)

Tous les textes classiques sur l'A/C (6,52) et les rapports récents (20,28,38) sont d'accord pour dire qu'une masse volumique supérieure ou égale à $\geq$1,78 g/cm^3, mais préférablement supérieure à celle-ci, est la mesure de protection la plus importante contre la corrosion, car elle empêche l'intrusion des agents agressifs. On obtient une forte masse volumique en gardant le rapport eau/ciment inférieur à 0,27 et en effectuant un bon compactage; elle est aussi utilisée comme mesure d'évaluation de la qualité (38). Eick a documenté la résistance de l'A/C aux sulfates en comparaison de matrices dépourvues d'amiante (20) (fig. 4-3). La corrosion n'attaque que la surface car une couche de protection complexe est formée par différents composés, notamment un gel de ciment hydraté et du carbonate de calcium. La couche augmente sa résistance au cours du temps. Toutefois, récemment, Buelow et ses collaborateurs (17) ainsi que Schock et Buelow (5) ont signalé une attaque considérable sur les tuyaux A/C durcis par autoclavage, même dans une eau faiblement agressive, à cause des pertes de silicate dans le réseau. Selon les exigences des normes (40), la formulation du composite A/C ne laisse pas plus de 1 % de chaux libre. Toutefois, l'étude du CEOCOR (28) souligne que la grande quantité de chaux, provenant des fortes teneurs en ciment, aide à résister aux attaques par les acides.

Dans une étude des effets de l'ajout de jusqu'à 3 % d'amiante au béton, Winer et Malhotra ont trouvé que l'amiante réduisait la maniabilité et exigeait plus d'eau ce qui a mené à une réduction de la résistance et à un rendement inadéquat (53).

Aux fins d'étudier le rendement d'une matrice A/C qui a été exposée à une hydratation préliminaire, Berkovich et ses collaborateurs ont évalué la durée et le niveau de capacité de moulage des mélanges de ciment Portland à forte teneur en C_3A (11 %) par rapport à ceux de faible teneur (3 %) (54). La figure 4-4 en montre les résultats.

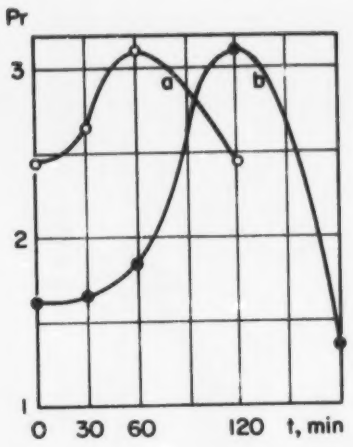


Fig. 4-4 - Courbes de capacité de moulage de l'amiante-ciment par rapport à l'unité, dans le cas de: a) ciment Portland à forte teneur en aluminate des cimenteries Spaskii et b) ciment Portland à faible teneur en aluminate de l'usine de Sukholozhskii après modification du temps d'hydratation préliminaire du ciment Portland dans la suspension d'amiante-ciment (54)

4.1.1.3 *Durcissement de l'amiante-ciment*

Certaines des caractéristiques des résultats de durcissement du HAC ont été examinées dans la section 4.1.1.1. Crennan et ses collaborateurs ont mis au point une méthode particulière: un prédurcissement de 24 heures à 30°C suivi d'un durcissement de 8 heures par autoclavage à 175°C (29). Des essais ont été faits sur des petits blocs de béton. Les conditions optimales, y compris celles des tuyaux A/C, devaient encore être déterminées au moment des essais (1963). La formule ne comprenait aucune silice, mais rien que les proportions normales de HAC et d'amiante. Une plus grande résistance à la corrosion a été obtenue pour les produits durcis en autoclave par rapport à ceux traités normalement.

Pour éclaircir les opinions divergentes, Quon et Malhotra ont examiné le durcissement de HAC pur et ont trouvé que la conversion en hydrates d'aluminate cubique, indépendamment du rapport eau/ciment, était supérieure aux températures plus élevées (50°C) (55). La plus grande résistance a été obtenue pour les échantillons durcis initialement à l'état humide (24 heures, 21°C) et exposés pendant un an; ce rendement a été suivi des échantillons humides durcis à sec (50°C).

Dans les essais statiques d'exposition en laboratoire, Barbakadze et ses collaborateurs ont établi que l'A/C durci en autoclave n'était pas plus résistant à la corrosion acide que les échantillons durcis normalement (38). La vitesse d'attaque était plus élevée dans le dernier cas, mais la profondeur finale de corrosion était comparable.

Le rendement des ciments Portland durcis normalement et en autoclave lorsqu'ils étaient soumis à de l'eau carbonatée est très sensiblement comparable (fig. 4-1).

L'étude du CEOCOR stipule que la densité et la compacité sont en général plus faibles pour les produits durcis en autoclave que ceux durcis par immersion dans l'eau; toutefois, leur comportement dans des milieux agressifs est à nouveau similaire à cause de la résistance chimique plus élevée du liant silice-carbonate (28). Contrairement à certaines opinions, l'expérience n'a pas montré de différences significatives entre le mode de fabrication et la résistance à l'attaque par l'anhydride carbonique agressif et les acides, lorsqu'on utilise du ciment Portland normal, à faible teneur en calcium et exempt de C_3A.

4.1.2 Considérations de conception pour les tuyaux et les réseaux de distribution

Kienow et Pomeroy ont conçu deux méthodes et des graphiques pour la conception de tuyaux d'égout (56). Ils énumèrent quatre moyens de contrôle de la conception des tuyaux résistant à la corrosion:

- modifier le matériau du tuyau
- augmenter l'épaisseur afin de prévoir la vitesse de corrosion prévue
- prévoir un revêtement inerte
- utiliser un matériau inerte pour le tuyau.

Sauf en ce qui concerne le dernier cas, toutes les conceptions sont utilisées dans les tuyaux A/C; la première a été examinée dans la section 4.1.1.

4.1.3 Enduits et revêtements de protection

La corrosion des tuyaux en métal et en

béton a mené, il y a longtemps, à la mise au point de mesures de protection. Des enduits, des revêtements ainsi que des pellicules déposées sont différenciés. L'acier a été protégé pendant plus de 50 ans au moyen d'enduits de protection et l'expérience accumulée a été directement transférée à la tuyauterie A/C.

Lorsque les tuyaux ont été introduits au Royaume-Uni en 1928, les surfaces intérieures et extérieures ont été enduites (45). Graduellement, ces mesures ont été omises, à cause du bon rendement des tuyaux A/C, mais étant donné l'utilisation accrue dans les climats plus chauds, le rendement devait être amélioré et les spécifications techniques devaient être réévaluées.

L'utilisation d'enduits et de revêtements de protection est une mesure passive prévue pour séparer les parois de la tuyauterie des milieux agressifs qui peuvent ou non être contrôlables et, par conséquent, les conditions agressives possibles doivent être soigneusement évaluées au stade de la conception (6). Dans des conditions particulières, les spécifications techniques des tuyaux A/C exigent la consultation avec le fabricant (28,40).

Une variété considérable de matériaux sont disponibles comme enduit de protection, mais ne sont pas toujours utilisés à leur avantage. Springenschmid et Letsch ont précisé les exigences suivantes en ce qui concerne les enduits (57):

1. haute résistance à la diffusion
2. bonne adhésion
3. aucune fissuration au cours du temps ou de modification adverse des propriétés mécaniques et physiques
4. résistance supplémentaire aux contraintes à la suite de variations possibles de la température

Comme le révèlent les références bibliographiques, souvent les ennuis ne sont découverts qu'après l'enfouissement des tuyaux et dans ce cas, la pose du revêtement peut ne plus être possible.

4.1.3.1 *Pose des enduits de protection en cours de fabrication*

On peut ajouter peu de chose au tableau 2-5 de l'étude du CEOCOR (28) qui précise les enduits protecteurs (section 2.2). Il contient une description détaillée des concentrations limites des agents corrosifs dont l'utilisation est admissible tant avec les tuyaux protégés qu'avec ceux qui ne le sont pas. Des matériaux sont suggérés pour la protection extérieure et intérieure; les produits préférés sont: brai de houille, bitume, brai de houille-époxy et époxy.

Un pH supérieur ou égal à ≥ 6 est une limite prudente qui est importante pour les tuyaux non protégés qui sont exposés à des milieux corrosifs; des limites sont aussi suggérées pour tous les enduits utilisés. Ces données doivent être comparées aux spécifications couramment valides de l'ASTM (40) et aux nouvelles lignes directrices également prudentes, proposées au Royaume-Uni (46). Ces lignes suggèrent qu'un pH supérieur ou égal à ≥ 6 soit utilisé avec les tuyaux non protégés et que l'eau y contienne moins de 0,2 % de sulfate et une concentration en anhydride carbonique inférieure à la moitié de la dureté temporaire.

Il y a aussi une différence importante d'efficacité des enduits utilisés pour protéger les tuyaux A/C de l'eau potable et des effluents d'égouts. Dans le premier cas et dans le cas cité tout au début, le bitume est utilisé le plus souvent, en plusieurs couches de 50 à 500 µm d'épaisseur (6). Des pellicules de brai de houille-époxy, selon Kienow et Pomeroy, ont bien servi à cet usage pendant environ 50 ans (56).

Dekker a présenté des données sur la perméabilité à l'eau des enduits utilisés le plus souvent (tableau 4-4); en ce qui concerne les enduits les moins perméables, le temps de saturation des échantillons de béton a été mesuré en décennies (60).

La durabilité des canalisations d'égout enduites d'asphalte allaient d'excellente à faible. Barnes déclare qu'en Australie les enduits peints sur la canalisation ne sont pas préférés (58). Dans le cas d'une corrosion sévère en climat modéré, Eick suggère d'utiliser des enduits de résine époxy pure ou mélangée au goudron (20). Étant donné que des défaillances ont lieu avec des enduits apparemment minces ou appliqués de façon incorrecte, la tendance

Tableau 4-4 - Perméabilité à l'eau des enduits organiques (60)

	Perméabilité g/cm^2 par jour	Temps de saturation, 80 mm d'épaisseur, béton vibré
Béton vibré à haute fréquence 80 mm d'épaisseur	$100 \cdot 10^{-4}$	2 mois
Émulsion de bitume, 300 µm	$85 \cdot 10^{-4}$	2-5 mois
Solution de bitume, 300 µm	$2,5 \cdot 10^{-4}$	6-16 ans
Peinture au bitume, 300 µm	$0,5 \cdot 10^{-4}$	35-88 ans
Brai de houille époxy, 300 µm	$0,7 \cdot 10^{-4}$	18-44 ans
Époxy sans solvant, 500 µm	$1,1 \cdot 10^{-4}$	15-40 ans

actuelle est d'utiliser deux ou plusieurs couches soigneusement appliquées sur un tuyau chauffé ou non, peut-être même avec un apprêt, mais sans aucun solvant. Day (59) et d'autres (46) préviennent de l'existence possible de parties infimes non recouvertes par suite de piquage du solvant évaporé et soulignent le besoin d'un contrôle strict de la qualité et des aspects mécaniques qui pourraient éventuellement conduire à un coût excessif en regard des tuyaux fabriqués à partir d'autres matériaux.

Le remplacement d'un matériau d'enduit par un autre, sans en considérer les répercussions potentielles, peut s'avérer une source d'ennuis comme l'a révélé Yuskus dans le cas du tuyau A/C revêtu de vinyle à Ashland, Massachusetts, États-Unis (61).

En 1960, aux fins de remédier à un arrière goût asphaltique dans l'eau potable, qui provenait de l'enduit de protection dans le tuyau A/C, une solution à 70 % de vinyle dans le tétrachloroéthylène (TCE) a été utilisée pour enduire les parois intérieures. Plus de 1 000 km de ce tuyau ont été installés dans les États de la Nouvelle-Angleterre. Le solvant chloré ne s'est pas dissipé avant l'enfouissement des tuyaux et l'eau contenait plus de $40/10^9$ TCE, soit le niveau de réponse suggéré et non nocif. De même, de fortes concentrations de TCE, non dissipées même après 5 ans, ont été trouvées ailleurs par Wakeham et ses collaborateurs (62). Un programme de recherche destiné à étudier ces problèmes comprenait premièrement l'établissement d'une méthode par chromatographie en phase gazeuse afin de mesurer le TCE, ensuite une évaluation approfondie sur le terrain des conditions et finalement la réhabilitation du tuyau par revêtement. Ce dernier point est traité dans la section 4.1.3.2.

Diederich a résumé les exigences de revêtement anticorrosif non peint, par exemple le chlorure de polyvinyle mou de 2,5 mm soudé (63):

1. Il doit résister à l'influence de tous les éléments des eaux usées et doit réduire la corrosion par l'hydrogène sulfuré.
2. Il doit satisfaire complètement aux exigences mécaniques des réseaux d'évacuation d'eaux usées, par exemple l'érosion, l'incrustation, la fissuration.
3. La fixation à la structure doit être bonne et permanente.
4. Il doit être insensible aux effets biologiques qui se passent dans les réseaux d'évacuation d'eaux usées.
5. Les raccords du revêtement doivent satisfaire aux mêmes exigences.

Les revêtements sont de plus en plus utilisés pour les situations difficiles en ce qui concerne les égouts; pour un coût relativement modique ils améliorent considérablement la durée de service. Toutefois, ils ne font d'habitude pas partie du tuyau A/C qui, à cause de sa surface lisse et dense, assure déjà une barrière résistant considérablement à la corrosion.

4.1.3.2 *Application des revêtements de protection après enfouissement des tuyaux*

C'est une des opérations les plus difficiles, mais en même temps elle est requise de la

Tableau 4-5 - Comparaison de la teneur en tétrachloroéthylène (TCE) entre les tuyaux revêtus de vinyle et de ciment (61)

N° d'essai Date Changement de la teneur par jour	Approvision-nement ppb*	Réseau de tuyau D (état original) ppb	Réseau de tuyau B (revêtement de ciment sur du vinyle) ppb	Réduction %
A-6 to A-13 9/19 - 9/26/80 un changement	0,8	312,0	3,7	99
B-1 to B-6 9/29 - 10/10/80 deux changements	0,4	179,0	0,4	100
C-1 to C-6 10/14 - 10/24/80 trois changements	2,4	81,0	1,0	97
D-1 to D-6 10/27 - 11/7/80 quatre changements	1,0	26,0	3,4	96
E-1 to E-7 11/19 - 11/24/80 cinq changements	0,0	23,0	0,1	100

* ppb = parties par milliard

façon la plus urgente. Dans la plupart des cas, les tuyaux d'eau ont un diamètre trop faible pour permettre l'entrée du personnel d'entretien; les égouts sont souvent beaucoup plus grands.

Selon Yuskus, le problème des tuyaux A/C à revêtement de vinyle qui libèrent du TCE dans l'eau a été résolu avec succès en faisant un nettoyage du tuyau et en sortant le revêtement de vinyle au moyen de brosses métalliques, et en y apposant un nouveau revêtement constitué par une couche de 8 à 9 mm de mortier de ciment appliqué mécaniquement. Le tableau 4-5 (61) fait une comparaison de la teneur en TCE des tuyaux revêtus de vinyle et de ceux à enduit de ciment. La teneur en TCE se trouvait bien dans les limites suggérées. Buelow et ses collaborateurs ont signalé que le tuyau A/C a été réhabilité au moyen d'une technique identique (mettant en jeu le dépôt de revêtement à la calcite) (17).

En ce qui concerne la réparation des revêtements époxy endommagés des grands égouts qui seraient beaucoup trop chers à remplacer, Seyfried signale une technique améliorée pour appliquer une pellicule de résine époxy (64). Il a montré, dans des photos des surfaces prises par microscope électronique à balayage, l'effet de l'application d'une pellicule de résine époxy, avec et sans solvant (figs. 4-5, 4-6). Dans le premier cas, la surface était fissurée de façon distincte et aurait donc pu procurer une entrée facile pour les fluides corrosifs. En plus, il a cité les exigences suivantes pour refaire un revêtement avec succès:

- une couche d'au moins 500 à 600 µm
- application sans air
- bonne adhésion à la base
- surface lisse prédominante, réalisée par sablage et enduite avec des mortiers spéciaux, suivie d'un lissage.

Aux endroits réparés, davantage d'attaques par le milieu transporté peuvent être empêchées par le traitement pertinent.

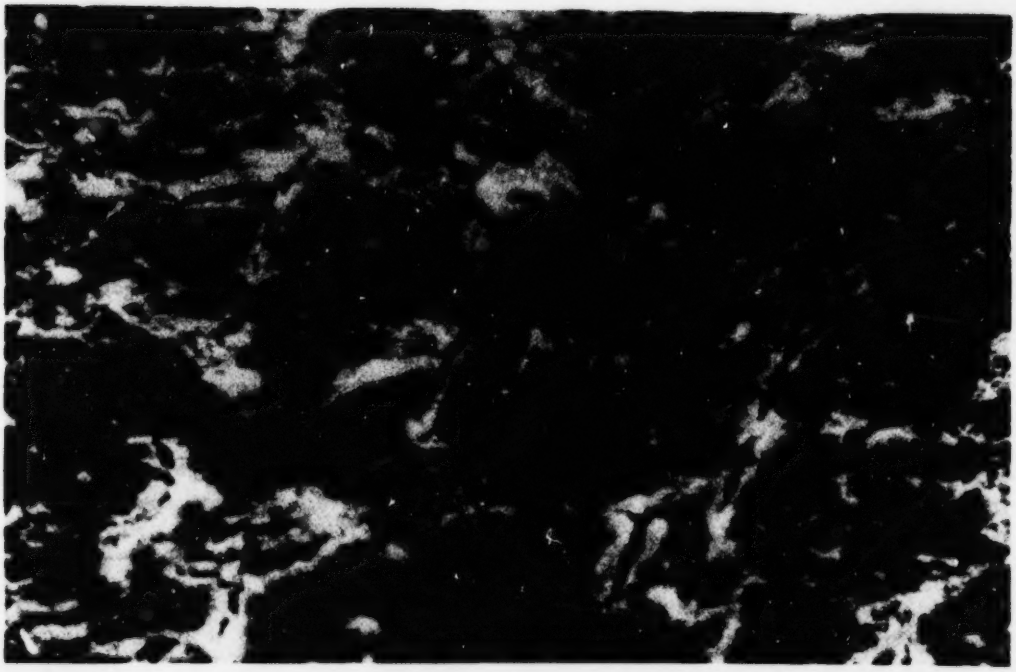


Fig. 4-5 - Surface d'un enduit aux résines époxy, atomisé avec l'air avec un solvant (grossissement x 1400) (64)

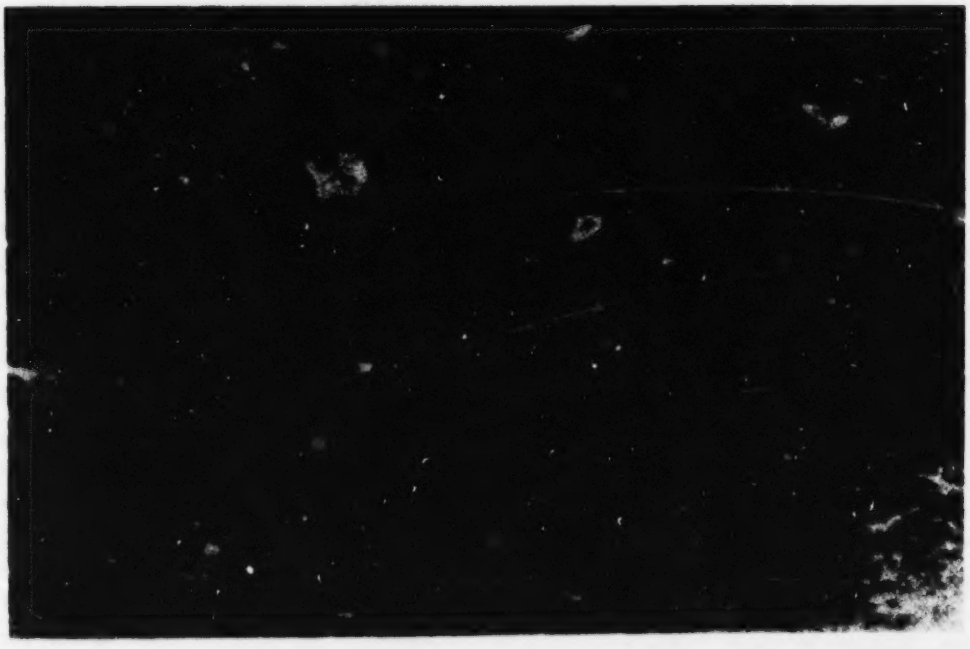


Fig. 4-6 - Surface d'un enduit aux résines époxy, atomisé sans air et sans solvant (grossissement x 1400) (64)

4.1.3.3 *Dépôt, après enfouissement, de pellicules de protection à partir de l'eau transportée*

Le dépôt de pellicules de protection à partir de l'eau transportée, après l'ajout de certains produits chimiques, est une technique bien connue utilisée depuis longtemps pour le traitement de l'eau. Elle a d'abord été appliquée pour la première fois pour combattre la corrosion des tuyaux en métal ferreux et son utilisation s'est étendue naturellement aux tuyaux A/C.

Déjà au début des années 60, Eick a parlé de l'utilisation des silicates et des phosphates comme additifs de protection (19). Il a été incapable de confirmer une revendication du fabricant au sujet du succès d'un produit au silicate (Ferrosil), car aucune pellicule n'a été formée en eau corrosive. Toutefois, le phosphate en quantité suffisante a déposé une pellicule dès que le produit de solubilité du phosphate calcium a été dépassé. À diverses époques, d'autres produits, par exemple l'oxyde de zinc, les orthophosphates et les polyphosphates de zinc ont été soumis à des essais. La chaux qui est utilisée le plus souvent et dans des conditions favorables, mène à un dépôt de pellicules de carbonate de calcium. Merril et Sanks ont résumé et donné des directives détaillées pour son utilisation (8).

Même dans le cas d'une eau corrosive sous-saturée et oxygénée, des pellicules de protection peuvent se déposer par moment à partir des inhibiteurs naturellement présents. Dans ses recherches sur l'eau à Amherst, Massachusetts, États-Unis, Zajicek a signalé que des composés du fer et du manganèse se sont déposés dans les pores, ce qui a protégé la surface A/C des attaques (65,66). Buelow et ses collaborateurs sont arrivés à une conclusion identique en citant une eau fortement corrosive qui, de façon assez surprenante, n'a pas corrodé le tuyau étant donné qu'il y avait une pellicule déposée d'une substance semblable à la rouille (17). Ces inhibiteurs naturels sont souvent partiellement éliminés au cours du traitement normal de l'eau, rendant ainsi l'eau plus corrosive (65). Kristiansen a observé dans sa boucle d'essais l'eau d'Oslo, Norvège, et y a trouvé une pellicule de protection provenant d'une boue formée à partir d'une eau normalement agressive, à faible teneur en calcium et faible teneur en anhydride carbonique (67). L'analyse de cette pellicule a révélé du manganèse, beaucoup de fer et de la silice et des composés de magnésium. La corrosion du tuyau s'est considérablement accrue pendant les essais ultérieurs lorsque la pellicule de protection a été enlevée.

De la chaux a été continuellement ajoutée pour la protection contre l'eau "rouge" (rouillée) dans le réseau du East Bay Municipality District (EBMUD) à Oakland, Californie, États-Unis. Stinson et Carns ont signalé (68): "La pratique permanente et de longue durée du district consistant à redresser le pH de ces eaux traitées...par addition de chaux a protégé de la corrosion pendant 40 ans les conduites principales A/C du réseau. Cette conclusion a été confirmée en examinant plusieurs tronçons de tuyau prélevés dans tout le réseau. Un tronçon type de tuyau A/C, qui était dans le réseau depuis environ 41 ans, avait une mince couche de protection et n'exhibait aucune érosion de la paroi originale du tuyau."

Deworm et ses collaborateurs (69) ont examiné des échantillons de sept réseaux de distribution d'eau enfouis entre 8 et 40 ans. Ils ont trouvé que les tuyaux A/C étaient protégés par le dépôt d'une pellicule d'un brun verdâtre et qu'ils n'étaient pas corrodés. L'eau n'était pas agressive.

La présence de composés du fer et du manganèse au-dessus d'un niveau admissible (faible) a un effet défavorable sur la saveur et l'aspect de l'eau. Par conséquent, Buelow et ses collaborateurs (17) ainsi que Schock et Buelow (5) ont étudié l'effet de l'ajout continu d'un composé du zinc et de la formation de pellicules qui est un procédé utilisé dans les tuyaux métalliques. Pour les humains, le zinc est admissible jusqu'à 5 mg/L et peut-être moins pour les poissons. Les auteurs ont mis au point et documenté une technique de protection des tuyaux A/C en utilisant 1 mg/L ou moins de zinc (sous forme de chlorure ou d'orthophosphate). Le coût est comparable à celui de la fluoruration. La pellicule

de composé du zinc protège de la corrosion le tuyau A/C, mais un tuyau détérioré ne peut pas être remis en état par cette technique.

Dès qu'une pellicule s'est formée, le produit chimique choisi doit être ajouté de façon continue, autrement le produit de solubilité du composé protecteur peut de nouveau être déséquilibré et peut mener à une dissolution de cette pellicule.

Étant donné que la formation des pellicules met en jeu le traitement de l'eau, cette question est traitée davantage dans la section 4.2.1.

4.2 CONTRÔLE DU FLUIDE TRANSPORTÉ

4.2.1 Traitement de l'eau potable

4.2.1.1 *Conditionnement de l'eau potable*

La plupart des eaux potables exigent un traitement particulier qui assurera sa qualité sous divers aspects, comme l'indique le tableau 2-2 (32). En outre, il faut un traitement pour protéger de la corrosion les réseaux de distribution d'eau.

Bien que l'on ait appris et appliqué beaucoup au cours de ces dernières décennies, ce n'est que maintenant que la corrosion et sa prévention sont fondées sur une théorie saine. Par conséquent, le traitement de l'eau et son contrôle se sont modifiés considérablement ces dernières années, principalement à la suite des nouvelles connaissances de la chimie de l'eau et de la disponibilité de nouveaux outils pour son évaluation (25).

La plus grande différence se trouve dans la compréhension et les mesures actuelles de contrôle de l'anhydride carbonique. Les eaux à faible teneur en calcium et alcalinité, c'est-à-dire des eaux sous-saturées, doivent être traitées de préférence par saturation, car elles sont très agressives. L'analyse rationnelle des conditions et des exigences de traitement ont été simplifiées maintenant et les usines de traitement d'eau peuvent être exploitées correctement et économiquement. La plupart du temps, l'eau est traitée avec de la chaux pour qu'elle dépose une pellicule de carbonate de calcium. Merril et Sanks ont donné des renseignements détaillés sur les méthodes et par conséquent seuls quelques points principaux sont traités ici (8).

Le conditionnement de l'eau exige les méthodes suivantes (8):

- déterminer l'état de saturation de l'eau non conditionnée;
- sélectionner le degré de sursaturation à atteindre;
- choisir le genre de produits chimiques de conditionnement;
- ajouter la quantité exacte de chaque produit chimique pour atteindre le degré souhaité de sursaturation;
- déterminer la quantité de $CaCO_3$ qui peut être formée par précipitation.

Les conditions sont choisies et suivies au moyen des diagrammes de Caldwell-Lawrence, qui sont disponibles pour les températures rencontrées le plus souvent et les teneurs globales en solides dissous des eaux traitées (8).

Les conditions favorables au dépôt de pellicules de carbonate de calcium sont (8):

1. L'eau devrait être sursaturée au moyen de $CaCO_3$. La sursaturation devrait être de 4 à 10 mg/L de $CaCO_3$, c'est-à-dire que la précipitation théorique potentielle de $CaCO_3$ devrait être de 4 à 10 mg/L.
2. Les valeurs de calcium et d'alcalinité devraient être chacune d'au moins 40 mg/L de $CaCO_3$ - plus si c'est réalisable économiquement. Les concentrations présentes devraient être de valeur approximativement égale.
3. Le rapport d'alcalinité: (Cl^- - SO_4^{2-}) devrait être d'au moins 5:1, pour lequel toutes les concentrations sont exprimées en mg/L de $CaCO_3$.
4. Le pH devrait être entre 6,8 et 7,3.
5. La vitesse de l'eau devrait dépasser 0,6 m/s.

Certaines de ces conditions peuvent être mutuellement exclusives, c'est-à-dire qu'on ne peut réaliser l'une d'elles qu'aux dépens d'une autre. Ces lignes directrices se rapportent aux tuyaux métalliques. Il y a peu de documentation en ce qui concerne l'alcalinité de A/C: (Cl^- - SO^{2-}) n'est pas critique étant donné que le tuyau

Tableau 4-6 - Équivalents masses de certains produits chimiques de traitement et coût approximatif des produits chimiques en vrac* (8)

Produit chimique	Équivalent masse chimique	Coût approximatif du produit chimique ¢/lb	¢/kg
CaO (chaux vive)	28	2,25	4,95
$Ca(OH)_2$ (chaux éteinte ou hydratée)	37	2,80	6,16
Na_2CO_3 (carbonate de soude)	53	3,00	6,6
NaOH (soude caustique)	40	7,50	16,5
$NaHCO_3$ (bicarbonate de soude)	84	9,89	21,8
CO_2 (anhydride carbonique, qualité commerciale)†	22	4,10	9,02

*FAB Seattle, janvier 1976

†On peut obtenir du CO_2 moins cher sous forme de produit de combustion

n'est pas soumis à la corrosion électrochimique. Pour se servir des diagrammes, il est nécessaire de déterminer l'alcalinité, le calcium et l'acidité des solutions en vrac ainsi que la température de l'eau et le total des solides dissous.

D'autres outils de mesure de la corrosion de l'eau comprennent: les indices Langelier et de Saturation, l'indice Ryzmer (moins fréquemment utilisé) et en particulier en Europe le diagramme de Tillmans. Ils sont tous désuets maintenant; ils sont traités ailleurs et dans les références.

Le traitement de l'eau est une opération récurrente et de grand volume et par conséquent l'économie y est très importante. Le tableau 4-6 donne les coûts de la plupart des produits chimiques courants de traitement de l'eau (8). Pour traiter une eau à faible teneur en calcium et de faible alcalinité, comme celle provenant de la fonte des neiges, il faudrait dépenser environ 27 fois plus que pour le traitement d'une eau normale étant donné que deux produits chimiques (chaux et anhydride carbonique) doivent être utilisés.

Un essai de dissolution du marbre est le moyen le plus fiable de détermination du potentiel de précipitation (état de saturation) de l'eau. On fait réagir du carbonate de calcium en poudre (marbre) avec l'eau. Si la concentration de calcium augmente, l'eau est sous-saturée; si elle diminue, elle est sursaturée; et s'il n'y a aucun changement, elle se trouve à l'équilibre.

4.2.1.2. *Élimination des fibres d'amiante de l'eau potable*

Bien que le fait d'empêcher la libération des fibres d'amiante dans l'eau soit le premier but du contrôle de la corrosion, leur élimination en cas de libération est d'un très grand intérêt. Cette élimination est aussi du domaine du traitement de l'eau.

Récemment, un certain nombre de rapports ont traité de ce problème à l'échelle du laboratoire. Lawrence et ses collaborateurs ont optimisé l'élimination des fibres d'amiante en se servant de sable pour la filtration et de composés du fer pour la floculation. Ils ont pu réduire la teneur en amiante en deçà des limites détectables ($<2 \times 10^4$ fibres par litre) (70). Toft et ses collaborateurs ont signalé que la coagulation avec filtration est efficace pour l'élimination de l'amiante jusqu'à un rapport de 300:1 (15).

Un rapport sur la filtration de l'eau pour l'élimination des fibres d'amiante est disponible auprès de l'U.S. Environmental Protection Agency (66) (Agence de protection environnementale des États-Unis) et un brevet américain a été émis pour l'élimination des fibres d'amiante de l'eau (71). Le procédé est fondé sur un lit d'oxyde de magnésium qui retient pratiquement toutes les fibres.

4.2.2 Traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées est beaucoup plus difficile et moins contrôlable que celui de l'eau potable. Toutefois, comme l'a signalé Barnes, même dans des pays aussi chauds que l'Australie un contrôle satisfaisant a été réalisé (58).

Environ 400 composés sont présents dans les eaux usées et par moment leurs concentrations dépassent celles qui corroderont les tuyaux A/C. En outre, les conversions microbiologiques du soufre jouent un rôle particulièrement prééminent dans la dégradation des tuyaux A/C (section 2.3.4). Par conséquent, la plupart des efforts sont dirigés vers le contrôle et la réduction de leurs effets. Depuis l'identification de l'action du thiobacillus sur les matériaux liés au ciment par Parker en 1945, de nombreuses améliorations ont été faites, quelquefois à des coûts élevés et après que des ennuis se furent produits dans les réseaux attaqués.

Selon Barnes, la pratique vieille de ~40 ans déjà, utilisée à Melbourne pour le contrôle de la corrosion des égouts, est fondée sur le principe d'une conception et d'une gestion soigneusement détaillées des réseaux (58). Il donne quatre directives principales:
- minimaliser la production d'hydrogène sulfuré
- minimaliser le dégagement d'hydrogène sulfuré
- minimaliser la formation d'acide sulfurique
- minimaliser les effets de l'acide sulfurique.

Il a ensuite développé chaque point en plus amples détails. Les exigences se rapportaient au béton, mais elles satisfont de façon inhérente à un certain nombre des exigences des tuyaux A/C étant donné qu'il y a une similitude technologique. Le tuyau A/C se caractérise de la façon suivante:
- surfaces hydrauliques de grande qualité
- faible perméabilité
- haute teneur en ciment
- utilisation de ciments résistant au sulfate
- réaction fortement alcaline normale dans l'A/C.

Wierig souligne que seule la collaboration la plus complète entre les planificateurs, les concepteurs, les technologues et les gestionnaires de contruction peut mener à une production de constructions en béton résistantes (72). Le succès du contrôle de la corrosion n'est pas seulement un problème isolé de matériaux, comme on le sous-entend souvent, mais ce succès peut être assuré de façon considérable au moyen d'une conception pertinente et de conditions d'exploitation appropriées. Eick a déclaré que ces conditions d'exploitation ne sont pas incontrôlables, étant donné qu'elles dépendent (20):
- de la situation géographique (climat, pluie)
- des conditions de conception (dénivellation, raccordements aux maisons)
- de la teneur en oxygène des eaux usées
- de la dilution
- du débit et du temps de transport
- du traitement des déchets chimiques de l'eau
- du niveau de remplissage de la tuyauterie.

Schremmer a étudié en plus amples détails les effets de la température et de la concentration de l'hydrogène sulfuré (73):
- Étant donné qu'il est de nature microbiologique, ce processus dépend fort de la température.
- À 18°C, avec de fortes concentrations d'hydrogène sulfuré, les quantités de soufre libre formées et de celles liées en acide sulfurique étaient à peu près égales. À des concentrations plus faibles, plus de soufre était transformé en acide, par exemple au cours d'une période de 12 semaines, des solutions atteignant presque 6 % d'acide sulfurique ont été formées. À des températures plus faibles, on obtient certainement beaucoup plus de soufre libre. Il a été sans doute utilisé dans la formation de plus d'acide sulfurique, mais la confirmation de cette hypothèse n'a pas encore été faite. Il se peut que cette confirmation ait déjà été fournie dans des recherches plus récentes (section 2.3.4).

Eick a précisé les conditions de réduction de formation d'hydrogène sulfuré dans les eaux usées (tableau 4-7) et pour empêcher son dégagement (tableau 4-8) (20). De plus, il a montré des données prouvant la résistance accrue des tuyaux A/C à l'attaque des acides (HCl) au cours du temps, mais il a suggéré que l'on protège tous les nouveaux tuyaux au moyen d'un enduit.

Dans son exposé systématique, Zietz a examiné tous les traitements chimiques possibles

Tableau 4-7 - Réduction de la formation d'hydrogène sulfuré dans les eaux usées (20)

- Enrichissement en oxygène des eaux usées par:
  - admission d'air frais
  - bonne ventilation et turbulence du niveau des effluents
  - admission d'eau de pluie, d'eau douce (non salée)
  - dénivellation, raccordement aux maisons, etc.
- Réduction par dilution des sulfates et des concentrations de protéines (nutriments)
- Bactéricides comme additif
- Transport rapide des eaux usées, pente suffisante
- Température inférieure à <10°C, empêchement d'admission d'eaux usées chaudes

La formation d'hydrogène sulfuré est fonction de la température (optimum 27 à 39°C).

Aux températures inférieures à 10°C il se produit à peine encore de l'hydrogène sulfuré. Toutefois, cette production augmente avec la température à cause:

- de la vitesse de réaction accélérée thermodynamiquement
- de la multiplication accrue des bactéries
- du coefficient de solubilité négatif de l'oxygène dans l'eau:

  0°C: 14,2 mg O_2/L
  10°C: 10,9 mg O_2/L
  20°C: 8,8 mg O_2/L
  40°C: 6,6 mg O_2/L

pour la prévention de l'odeur et de la corrosion (44). Ils sont compilés au tableau 4-9 qui fait une comparaison inestimable des coûts. Seyfried a aussi présenté une comparaison du même genre. L'oxygène technique est en général le plus efficace (64).

4.3 CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT EXTÉRIEUR

Après l'enfouissement, il y a peu de possibilité de changement. Les conditions corrosives du sol et des eaux souterraines doivent être soigneusement évaluées avant le choix d'un tuyau particulier à enfouir, par exemple avec ou

Tableau 4-8 - Prévention du dégagement d'hydrogène sulfuré des eaux usées (20)

a) Prévention de la turbulence des eaux usées déjà septiques
b) Température inférieure (l'hydrogène sulfuré a aussi un coefficient de solubilité négatif; dégagement plus fort aux températures plus élevées).
c) Redressement alcalin des eaux usées (la quantité d'hydrogène sulfuré non dissocié augmente à mesure que la valeur du pH diminue. Les alcalis forment des ions HS qui ne sont pas dégagés.
d) Remplissage complet de la tuyauterie
e) Admission sous faible turbulence des eaux usées septiques et sous pression dans les canalisations à niveau libre.

Tableau 4-9 - Récapitulation des méthodes d'élimination d'hydrogène sulfuré des eaux usées (44)

Méthode	Remède	Point d'admission dans une tuyauterie sous pression	Consommation établie dans les eaux usées	Conditions de réaction appropriées	Coût par m^3 d'eaux usées en pfennigs allemands	Comptage à 42 000 m^3 d'eaux usées par mois avec une teneur en sulfure de 7,4 mg/L	Observations
Utilisation d'eau oxygénée (peroxyde d'hydrogène)	Oxydation du sulfure d'hydrogène	Temps de débit de 10 à 20 minutes avant l'extrémité du tuyaux	1,8 g H_2O_2/g H_2S	Valeur de pH environ ~7 Laisser réagir dans le rapport molaire 1:1 Empêcher les excès	5,8	1,0 m^3 de peroxyde d'hydrogène à 50 %	
Utilisation de chlore sous forme de solution contenant du chlore	Oxydation de l'hydrogène sulfuré	Temps de débit de 1 à 10 minutes avant l'extrémité du tuyau	3,4 g Cl_2/g H_2S	Valeur de pH environ ~8	4,6	7,6 m^3 d'eau de javel	
Utilisation de sulfate de fer (II)	Précipitation de sulfure de fer	À la fin du tuyau sous pression	8,3 g $FeSO_4.7H_2O$/g H_2S	Valeur de pH environ ~10	2,2	12,8 m^3 de solution saturée de sulfate de fer (II)	Le potentiel d'oxydo-réduction dans les eaux usées reste à un niveau faible
Injection d'oxygène pur dans le tuyau sous pression	Maintien de conditions aérobies dans le tuyau	Au début du tuyau sous pression	4500 m^3 O_2/mo. calculé selon (9)	--	6,7 à 7,5	4500 m^3 O_2	
Utilisation de chloro-benzènes émulsifiables	Suppression de micro-organismes formant des sulfures	Au début du tuyau sous pression	≈85 g/m^3 d'eaux usées	--	165	3,3 m^3 de solvex K	En vertu des lois sur l'environnement son introduction dans une exploitation commerciale est interdite. L'utilisation de cette méthode n'est pas recommandée.

sans enduit de protection. Les spécifications techniques et la protection suggérée pour les tuyaux A/C contiennent des directives au sujet des conditions environnementales dans lesquelles on peut s'attendre à une durée de service raisonnablement normale (28,40,46). Les niveaux admissibles d'acidité des sols, des eaux souterraines et de l'eau transportée sont donnés avec les limites des sulfates, des chlorures et d'autres sels.

À titre de mesure temporaire de neutralisation des sols acides, Huenerberg et Tessendorff suggèrent l'ajout de matière alcaline, comme la chaux, dans la tranchée, avant la pose du tuyau (6).

4.4 UTILISATION DE BACTÉRICIDES

Pour contrôler les micro-organismes, des bactéricides sont ajoutés à l'un des trois emplacements possibles: la matrice du tuyau A/C, l'enduit de protection, ou le fluide transporté.

Crennan et ses collaborateurs ont évalué de nombreux bactéricides à ajouter aux formules A/C (29). Ils ont essayé les composés suivants avec des résultats prometteurs:

- oxyde cuivrique
- chlorure mercurique
- composé d'ammonium quaternaire
- diphénylnitrate mercurique
- acide salicylique
- molybdate d'ammonium
- acétate de tributylétain

Toutefois, lorsqu'ils ont été incorporés à des concentrations de 0,1 % dans des blocs d'essais pour exposition en laboratoire et dans des tuyaux d'égout expérimentaux au cours d'essais sur le terrain, ils n'ont montré aucun effet bénéfique important.

Le mieux connu des effets bactéricides est celui des enduits de brai de houille qui ont été utilisés depuis longtemps (6,28,59). Toutefois, ils ne peuvent pas être utilisés à l'intérieur des tuyaux d'eau potable; les phénols ne sont pas admissibles, car ils diminuent la qualité de l'eau.

Les bactéricides ajoutés aux eaux usées sont aussi efficaces dans une certaine mesure, mais cette pratique n'est pas recommandée (20,44). Les chlorobenzènes sont aussi efficaces, mais selon Zeitz (44), le coût est beaucoup plus élevé que celui des autres produits chimiques utilisés pour le traitement (tableau 4-9). Qui plus est, leur utilisation n'est pas autorisée légalement.

5. CONCLUSIONS

1. Pendant sept décennies, les tuyaux A/C ont desservi des dizaines de millions de gens du monde entier pour le transport fiable, efficace et bon marché de l'eau potable et des eaux usées. Par contraste, plus de 15 millions d'enfants, du nouveau-né à l'âge de 4 ans, sont morts en 1982, principalement à cause du manque d'eau propre, d'hygiène et de soins médicaux.
2. La technologie des tuyaux A/C a été perfectionnée et hautement automatisée. Mis à part l'amiante qu'ils contiennent, les matériaux utilisés sont abondants, souvent disponibles localement et bon marché. Dans la fabrication des tuyaux A/C, la conformité la plus stricte aux exigences de la technologie contemporaine du ciment mène à un matériau lié de façon efficace au ciment. Sa propriété anticorrosive la plus importante est sa forte densité, qui dans une grande mesure, empêche l'intrusion des agents corrosifs.
3. Comme presque tous les matériaux, le tuyau A/C est sujet à plusieurs sortes de corrosion. Dans les tuyaux sous pression, l'agent le plus corrosif est l'eau douce (faible teneur en calcium et carbonate). Dans les tuyaux d'égout, le soufre est converti microbiologiquement en acide sulfurique, avec corrosion subséquente par l'acide et expansion des sels de sulfate.
4. Une nouvelle théorie de la corrosion par l'eau douce a récemment vu le jour à partir des connaissances de la chimie de l'eau. Elle a révélé que les mesures antérieures de l'agressivité de l'eau n'étaient pas exactes, ce qui a souvent mené à des conclusions erronées et à une utilisation impropre du tuyau. Le comportement des tuyaux A/C est similaire à

celui des roches à la surface de la terre lorsqu'elles sont exposées à l'eau. Si l'eau ne contient pas suffisamment de calcium pour satisfaire aux exigences des lois de la thermodynamique chimique, l'eau les dissoudra des phases solides, que ce soit des roches ou des tuyaux A/C, avec la dégradation qui accompagne cette dissolution.

5. La corrosion de la matrice A/C ne s'effectue que par un nombre relativement faible d'agents de corrosion et seulement sur une faible couche de la surface. Dans les cas de corrosion grave et prolongée, des fibres d'amiante peuvent se libérer, ce qui est une source d'inquiétude, car l'amiante peut agir comme cancérogène dans les voies respiratoires. Les études épidémiologiques sur les effets de l'amiante qui peut être ingéré avec l'eau potable sont difficiles à réaliser étant donné les méthodes complexes de détermination, la présence abondante d'amiante naturel dans les eaux et le manque de données fiables à long terme sur l'exposition de la population générale. Jusqu'à présent, les études n'ont pas encore été capables d'établir sans équivoque si l'amiante, lorsqu'il est présent dans l'eau potable, est nocif pour les humains.
6. Plusieurs mesures de ralentissement important de la corrosion des tuyaux A/C comprennent des modifications du tuyau ou du fluide transporté. L'environnement de la canalisation (le sol) doit être examiné de façon critique avant l'enfouissement car il ne peut pas être modifié par la suite.
7. Des essais à long terme sur le terrain pour la modification de la matrice des tuyaux sous pression et d'égout ont montré que, au titre de la durabilité, les ciments à forte teneur en alumine sont de loin supérieurs au ciment Portland normal ainsi qu'aux ciments supersulfatés et à laitier de hauts fourneaux. Toutefois, ces deux dernières catégories sont supérieures au ciment Portland. Les tuyaux sous pression à ciment exempt de C_3A ont été les pires. Contrairement à l'opinion générale, le rendement dans l'eau potable agressive des tuyaux durcis normalement à l'état humide est comparable à celui des tuyaux durcis en autoclave ou même meilleur encore. La haute teneur en chaux libre des tuyaux durcis normalement, qui au cours du temps se transforme en carbonate, augmente la résistance à la dégradation ou tout au moins fournit plus de calcium. Dans les tuyaux durcis par autoclavage, il n'y a pratiquement aucun calcium libre et, par conséquent, l'eau douce attaque immédiatement les silicates de calcium de la matrice A/C. Toutefois, ces tuyaux sont bien plus résistants à l'attaque des sulfates, un fait qui aurait pu obscurcir la conclusion correcte jusqu'à présent. Dans les ciments à forte teneur en alumine, les tuyaux durcis par autoclavage sont aussi plus résistants à la dégradation. Jusqu'à présent, aucun matériau de remplacement n'a été trouvé pour égaler l'amiante, en particulier à cause de sa répartition homogène dans la matrice de ciment.
8. Des enduits sont d'usage répandu pour protéger les surfaces interne et externe du tuyau. Ils sont particulièrement importants pour la protection contre les attaques extérieures des sulfates, qui se forment à partir des activités microbiologiques mettant en jeu des composés du soufre dans les sols. Les brais de houille sont les enduits les plus efficaces étant donné leur action bactéricide, mais ils ne peuvent pas être utilisés avec l'eau potable.
9. La corrosion intérieure des tuyaux A/C sous pression peut être ralentie de façon relativement facile par dépôt de certains composés sur les parois des tuyaux. L'addition de chaux augmente la concentration de calcium dans l'eau de telle sorte qu'une pellicule protectrice de carbonate de calcium peut se former. La technique est d'usage répandu dans les usines de traitement de l'eau. Divers sels de zinc et même certains composés du fer, de la silice et du manganèse se comportent de façon similaire dans les eaux naturelles. Cette technique de dépôt d'une

pellicule ne peut pas rectifier une surface fort endommagée, il faut dans ce cas utiliser des techniques particulières de revêtement.

10. La protection des tuyaux d'égout contre la corrosion est la plus difficile des tâches en ce qui concerne la protection des tuyaux A/C. Elle est particulièrement grâve dans les climats chauds. Pour le succès de sa résolution, il est impératif d'établir une collaboration entre les planificateurs, les concepteurs, les constructeurs et le personnel d'entretien. La gestion du mouvement du fluide et de l'aération dans des réseaux conçus de façon appropriée, peut empêcher le développement de conditions anaérobies qui mènent à une activité microbiologique intense, à l'oxydation du soufre et à la formation ultérieure d'acide sulfurique. Des enduits protecteurs sont utilisés aussi. Parmi les traitements chimiques disponibles, l'introduction d'oxygène technique est la méthode préférée. Les bactéricides, bien qu'ils soient coûteux, sont des agents protecteurs logiques; toutefois leur utilisation n'est pas autorisée dans certains pays.

REMERCIEMENTS

L'auteur désire remercier les membres suivants de CANMET: V.M. Malhotra qui l'a introduit au sujet du béton, G.W. Riley qui l'a introduit à l'amiante, M. Silver pour une discussion des transformations microbiologiques du soufre, et J.A. Soles pour la relecture critique du manuscrit.

RÉFÉRENCES

1. Anon. "Symposium mondial sur l'amiante - L'amiante, l'hygiène et la société", programme; Montréal; 24-27 mai 1982.

2. Nebesar, B. et Riley, G.W. "Asbestos/cement pipe corrosion" - Part 1: Historical, technological, economic and statistical background" (La Corrosion des tuyaux en amiante-ciment - Partie 1: Documentation des éléments historiques, technologiques, économiques et statistiques); Rapport CANMET 83-16E, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1982.

3. Anderson, C.N. et Stone, R.W. "Leaching of asbestos-cement cooling-tower fill" (Lessivage du remplisseur d'amiante-ciment des tours de refroidissement); Electric Power Research Institute EPRI-CS-1777; avril 1981.

4. Herring, C. "Distill or drown: the need for reviews" (Distiller ou se noyer: le besoin d'un réexamen); Physics Today 21:9:27; 1968.

5. Schock, M.R. et Buelow, R.W. "The behavior of asbestos/cement pipe under various water quality conditions: Part 2. Theoretical considerations" (Le comportement des tuyaux en amiante-ciment sous diverses conditions de qualité de l'eau: Partie 2. Considérations théoriques); J Am Water Works Assoc 73:636-651; 1981.

6. Huenerberg, K. et Tessendorff, H. "Handbuch fuer Asbestzementrohre" (Manuel des tuyaux en amiante-ciment); Wien, Springer Verlag; 1977. (Allemand).

7. Denison, I.A. et Romanoff, M. "Effect of exposure to soils on the properties of asbestos-cement pipe" (Effet de l'exposition aux sols sur les propriétés des tuyaux en amiante-ciment); J Res Nat Bur Standards 47:367-379; 1951.

8. Merrill, D.T. et Sanks, R.L. "Corrosion control by deposition of $CaCO_3$ film: a handbook of practical application and interaction" (Contrôle de la corrosion par dépôt d'une pellicule de $CaCO_3$: manuel d'application et d'interaction pratique); Denver, American Water Works Association; 1978.

9. Health and Safety Commission Advisory Committee on Asbestos, "Final Report, Vol. 1 and 2" (Comité consultatif de l'amiante, "Rapport final"; Vol. 1 et 2); London, HMSO; 1979.

10. Cunningham, H.M. et Pontefract, R.D. "Asbestos fibres in beverages and drinking water" (Les fibres d'amiante dans les bois- sons et l'eau potable); Nature 232:332-333; juillet 1971.

11. Quint, S.M. "Transite pipe test line - determination of asbestos fiber in water" (Canalisation d'essai d'un tuyau de transport -détermination des fibres d'amiante dans l'eau); Johns-Manville Research Report 425-T-1360; 1971.

12. Kay, G.H. "Asbestos in drinking water" (L'amiante dans l'eau potable); J Am Water Works Assoc 66:9:513-514; 1974.

13. The American Water Works Association Research Foundation "A study of the problems of asbestos in water" (Une étude du problème de l'amiante dans l'eau); J Am Water Works Assoc 66:Part 2:1-22; sept. 1974.

14. "Étude nationale sur les fibres d'amiante dans les approvisionnements d'eau potable du Canada"; Rapport 79-EHD-34; Santé et Bien-être social Canada, Direction de l'hygiène du milieu, Direction générale de la protection de la santé"; 1979.

15. Toft, F., Wigle, D., Méranger, J.C. et Mao, Y. "Asbestos and drinking water in Canada" (L'amiante et l'eau potable au Canada); The Science of the Total Environment 18:77-89; 1981.

16. Millette, J.R., Clark, P.J., Pansing, M.F. et Twyman, J.D. "Concentration and size of asbestos in water supplies" (Concentration et dimension de l'amiante dans les approvisionnements d'eau); Environmental Health Perspectives EHP 34:13-25; 1980.

17. Buelow, R.W., Millette, J.R. McFarren, E.F. et Symons, J.M. "The behaviour of asbestos/cement pipe under various water quality conditions: A progress report" (Comportement des tuyaux en amiante-ciment sous diverses conditions de qualité de l'eau: Rapport d'avancement des travaux); J Am Water Works Assoc 72:91-102; 1980.

18. Kanarek, M.S., Conforti, P.M. et Jackson, L.A. "Chrysotile asbestos fibres in drinking water from asbestos-cement pipe" (Fibres d'amiante chrysotile dans l'eau provenant de tuyaux en amiante-ciment); Environ Sci Technol 15:8:923-925; 1981.

19. Eick, H. "Korrosionsfragen aus dem Transportwasser bei Asbestzementdruckrohen" (Problèmes de corrosion dans les tuyaux en amiante-ciment sous pression par l'eau transportée); Vom Wasser: Jahrbuch fur Wasserchemie und Wasserreinigungstechnik 27:1960:288-305.

20. Eick H. "Asbestzement als Abwasser-Kanalrohr" (L'amiante-ciment comme tuyau d'égout); Tech Wiss. Schriftenr ATV 1978:7:171-179.

21. Carrière, J.E. "Le comportement de tuyaux en amiante-ciment dans les sols agressifs"; Centre Belge d'Étude et de Documentation des Eaux 277:530-533; 1966.

22. Marks, R.L. et Hutchcroft, C.R. "Resistance of asbestos-cement pipe to corrosive soil conditions" (Résistance des tuyaux en amiante-ciment aux conditions corrosives des sols); Water Wastes Eng 49-53; juillet 1968.

23. Neveux, M. "La corrosion des conduites d'eau et de gaz - Causes et remèdes"; Travaux de la commission française d'étude de la corrosion des conduites, Ch. II, III; Paris, Éditions Eyrolles, 1968.

24. Franquin, J. "Action des eaux sur le béton et ses armatures métalliques"; Chapitre V: 202-229; ibid.

25. Stumm, W. et Morgan, J.J. "Aquatic Chemistry" (Chimie de l'eau), Ch. 3, 4, 5, 8; New York, Wiley Interscience; 1981.

26. Lea, F.M. "The chemistry of cement and concrete" (La chimie du ciment et du béton); New York, Chemical Publishing Company; 1971.

27. Grohmann, A. "Uebersicht ueber neuere Anschauungen zur Bedeutung der Kohlensaeure in Wasser" (Sommaire des nouveaux concepts sur la signification de l'anhydride carbonique dans l'eau); GWF-Wasser, Abwasser 115:2: 53-60; 1974.

28. "Tuyaux en amiante-ciment en milieu agressif"; La Tribune CEBEDEAU 413:167-184; 1978.

29. Crennan, J.M., Simpson, J. et Parker, C.B. "Influence of cement composition on the resistance of asbestos cement sewer pipes to H_2S corrosion" (Influence de la composition du ciment sur la résistance des tuyaux d'égout en amiante-ciment à la corrosion par H_2S); Corros Australas 5:1:5-4; 1980.

30. Schock, M.R., Logsdon, G.S. et Clark, P.J. "Evaluation and control of asbestos-cement pipe corrosion" (Évaluation et contrôle de la corrosion des tuyaux en amiante-ciment); Report EPA 600/D-81-067; National Association of Corrosion Engineers; 1981.

31. Halleux, G.I.D. et Bhatnagar, V.M. "New basic concepts in the evaluation of the aggressiveness of natural waters" (Nouveaux concepts fondamentaux dans l'évaluation de l'agressivité des eaux naturelles); dans Building Materials, Proceedings of the European Conference held 1980; Hornby, England, The Construction Press; 1981.

32. "Directives de qualité de l'eau potable canadienne 1978"; H48-10/1978; Comité consultatif fédéral-provincial sur l'hygiène du milieu et du travail; Santé et Bien-être social Canada; 1979.

33. Falecki, M. et Oliva, J. "Korozja rur AC w aspekcie transportu gazu" (Corrosion dans les tuyaux en amiante-ciment utilisés pour le transport du gaz); Gaz, Woda Tech Sanit Series 41:7:218-21; 1967.

34. "Asbestzementrohre in aggressiven Medien - CEOCOR Studie" (Tuyaux en amiante-ciment dans les milieux agressifs - Étude du CEOCOR); GWF, Gas Wasserfach: Wasser/Abwasser 120:2:62-68; 1979.

35. "Aggressive chemical exposure" (Exposition chimique agressive); dans: ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: materials and general properties of concrete; Detroit, American Concrete Institute; 1980.
Revised annually.

36. Helms, S.B. et McCoy, W.J. "Sulphate resistance of asbestos-cement pipe specimens" (Résistance aux sulfates d'échantillons de tuyaux en amiante-ciment); Am Concr Inst J 72 (12):714-719.

37. Riedel, W., Bimberg, R. et Kluge, H.G. "Die Bestaendigkeit von Asbest-, Glass-, und Mineralfassern im alkalischen Milieu (Résistance de l'amiante, du verre et des fibres minérales en milieu alcalin); Wis Z Hochsch Archit Bauwes Weimar 19:5/6:471-477; 1972.

38. Barbakadze, E.O., Kopytova, A.I., Krasnova, G.V. et Gnucheva, N.N. "Koroziya asbesttsementa v kyslikh i karbonatnykh vodakh" (Corrosion de l'amiante-ciment dans les eaux acides et carboniques); Tr Nauch-Issled Inst Asbesta, Slyudy, Asbestotsem Izdelii Proekt Stroit Predpr Slyudanoi Prom 29:197-219; 1973.

39. Opoczky, L. et Pentek, L. "Investigation of 'corrosion' of asbestos fibres in asbestos cement sheets weathered for long time" (Étude de la corrosion des fibres d'amiante des plaques d'amiante-ciment exposées aux éléments pendant une longue durée); dans Proc 1975 RILEM Internat Symp on fibre reinforced cement

and concrete, édit. A. Neville; Hornby, England, The Construction Press Ltd.; 1975.

40. "Standard method of testing asbestos/cement pipe" (Méthode normalisée d'essai des tuyaux en amiante-ciment); ASTM Designation C 500-79a; American Society for Testing and Materials; 1981.

41. Grohmann, A. "Die Kohlensaeure in dem Deutschen Einheitsverfahren II. Die Kalkaggressivitaet von Wasser" (L'acide carbonique dans la méthode II normalisée allemande. L'agressivité calcique de l'eau); Vom Wasser 38:97-118; 1971.

42. Silver, M. "Metabolic mechanisms of iron-oxidizing thiobacilli" (Mécanismes métaboliques du Thiobacillus oxydant le fer); dans Metallurgical applications of bacterial leaching and related microbiological phenomena, éditeurs: L.E. Murr, A.E. Torma, J.A. Brierley; New York, Academic Press Inc.; 1978.

43. Malhotra, V.M. "Béton de soufre et béton au soufre infiltré: propriétés, application et limites"; Progrès de la technologie du béton; MRP/MSL 80-89(TR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1980.

44. Zietz, U. "Die Anwendung chemischer Verfahren zur Vermeindung von Geruch - und Korrosionsproblemen in Abwassertransportleitungen" (Utilisation de méthodes chimiques pour éviter les problèmes d'odeur et de corrosion dans les tuyaux de transport des eaux usées); Techn. Wiss. Schriftenr ATV; 1978:7:125-145.

45. Koenig, W.A. et Stoelting. K.H. "Chemische Untersuchungen von Luftraum und Abwasser in tiefliegenden, grossdimensionierten Schmutzwassersammlern" (Études chimiques de l'atmosphère et des eaux usées dans les canalisations d'égouts principales, enfouies profondément et de grand diamètre); Techn. Wiss. Schriftenr ATV 1978:7:9-14.

46. "Corrosion resistance of asbestos/cement pipes" (Résistance à la corrosion des tuyaux en amiante-ciment); Water Services 82:973:151-152; 1977.

47. Kuznetsova, T.V. "Vliyanie rezhima obzhiga na kachestvo tsementa dlya proizvodstva asbestotsementnykh izdelyi" (Influence du régime de calcination sur la qualité du ciment utilisé pour la fabrication d'articles en amiante-ciment); Tr Gos Vses Nauchno-Issled Inst Prom-sti 32:46-57; 1977.

48. Hannant, D.J. "Fibre cements and fibre concretes" (Fibrociments et fibrobétons); New York, J. Wiley & Sons; 1978.

49. de Mahieu, L. "La théorie de l'asbeste-ciment; Contribution à l'étude des matériaux anisotropes à fibres de renfort"; Kapelle-op-den-Bos, Belgique, S.A. Eternit N.V.; 1973.

50. Walton, P.L. "Fibrous Concrete Symposium, Concrete International 1980 Congress"; London, 16th April 1980: Organized by the Concrete Society (Symposium sur le fibrobéton, Congrès international de 1980 sur le béton; Londres, le 16 avril 1980: organisé par la Concrete Society); Asbestos Bull 22: résumé 248; 1981.

51. Krenchel, H. et Hejgaard, O. "Can asbestos be completely replaced one day?" (Sera-t-il possible un jour de remplacer entièrement l'amiante?); dans: Proc 1975 RILEM Internat Symposium on fibre-reinforced cement and concrete, édit. A. Neville; Hornby, England, The Construction Press Ltd.; 1975.

52. Klos, H.G. "Asbestzement - Technologie und Projektierung" (Amiante/ciment - Technologie et conception); Wien, Springer Verlag; 1967.

53. Winer, A. et Malhotra, V.M. "Reinforcement of concrete by asbestos fibres" (Renforcement du béton par des fibres d'amiante); dans Proc 1975 RILEM Internat Symp on fibre-reinforced

cement and concrete, édit. A Neville; Hornby, England, The Construction Press Ltd.; 1975.

54. Berkovich, T.M. et Mishel, Z.G. "Vliyanie kharakteristik Portland tsementa na profiliruyemost asbest-tsementa" (Influence des caractéristiques du ciment Portland sur le moulage de l'amiante-ciment); Tr Inst VNII Proektasbesttsement 32:87-94; 1976.

55. Quon, D.H.H. et Malhotra, V.M.M. "Performance of high-alumina cement concrete stored in water and dry heat at 25, 35 and 50°C" (Rendement du béton de ciment à forte concentration en alumine entreposé dans l'eau et à sec à 25, 35 et 50°C); Rapport CANMET 78-15; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1978.

56. Kienow, K.K. et Pomeroy, R.D. "Corrosion resistant design of sanitary sewer pipe" (Conception de tuyaux d'égout résistant à la corrosion); Water Sewage Works; avr. 30:8-10; 1979.

57. Springenschmid, R. et Letsch, R. "Schutz von Beton durch Ueberzuege - Anforderungen an Untergrund und Ueberzuganwendungstechniken" (Protection du béton par enduits - Exigences des techniques d'application des enduits primaires); Techn. Wiss. Schriftenr ATV 1978:7: 193-201.

58. Barnes, F.B. "Melbourne experience of hydrogen sulphide corrosion and present practice for prevention of attack" (Expérience de Melbourne sur la corrosion par l'hydrogène sulfuré et pratique actuelle de prévention de ses attaques); Techn. Wiss. Schriftenr ATV 1978:7:105-109.

59. Day, K.J. "Updating epoxy lining for septic sewage situations: Internal and external protection of pipes" (Valorisation des revêtements époxy pour les effluents septiques); Paper E2 - Second International Conference, sept. 7-9; Univ. of Kent at Canterbury, England; 1977.

60. Dekker, T.T. "Organische Beschichtungen auf Beton oder Asbestzement bei Abwassersysteme" (Enduits organiques sur le béton ou l'amiante-ciment des réseaux d'évacuation des eaux usées); Techn. Wiss. Schriftenr ATV 1978:7:213-222.

61. Yuskus, L.R. "Tetrachloroethylene (TCE) concentration reduction in vinyl-lined asbestos-cement water mains through the application of cement mortar linings" (Réduction de la concentration en tétrachloroéthylène (TCE) dans les conduites d'eau principales en amiante-ciment revêtues de vinyle par enduits de mortier de ciment); Waltham, MA, Haley and Ward, Inc.; 1980.

62. Wakeham, S.G., Davis, A.C., Witt, R.T., Tripp, B.W. et Frew, N.M. "Tetrachloroethylene contamination of drinking water by vinyl-coated asbestos-cement pipe" (Contamination de l'eau potable par le tétrachloroéthylène dans les tuyaux en amiante-ciment revêtus de vinyle); Bull Environm Contam Toxicol 25:639-645; 1980.

63. Diederich, H. "Korrosionsschutz in Abwasseranlagen" (Protection des égouts contre la corrosion); Techn. Wiss. Schriftenr ATV 1978: 7:229-232.

64. Seyfried, C.F. "Untersuchungen von Korrosionsschaeden in einem Abwassersammler" (Études des dégâts causés par la corrosion dans un égout collecteur); Techn. Wiss. Schriftenr ATV 1978:7:37-50.

65. Zajicek, O.T. "Evaluation of natural inhibiting factors in an aggressive drinking water supply" (Évaluation des facteurs d'inhibition naturels dans une adduction d'eau potale agressive); Draft Report; United States Environmental Protection Agency; 1981.

66. "Asbestos/asbestiform research in EPA ORD" (Recherche sur l'amiante/amiantoide dans EPA ORD); U.S. Environmental Protection Agency

Report EPA-600-7-81-032; USEPA Industrial Environmental Research Laboratory; 1981.

67. Kristiansen, H. "Corrosion on asbestos cement pipes" (La corrosion des tuyaux en amiante-ciment); Vatten 33:1:53-61; 1977.

68. Stinson, K.B. et Carns, K.E. "Insuring water quality at a modern water utility" (Assurance de la qualité de l'eau d'un service public moderne de distribution d'eau); dans Proc Nat Conf Environmental Engin; New York, ASCE; 1979.

69. Deworm, J.P. "Een exploratorisch onderzoek op het gebied van asbestverontreiniging in drinkwater" (Recherche préliminaire sur la contamination de l'eau potable par l'amiante); Centre d'études de l'énergie nucléaire, Mol, Belgique, Studieopdracht (Rapport d'étude): S.C.K./C.E.N. 928 030/948; mars 1982.

70. Lawrence J., Tosine, H.M. Zimmermann, H.W. et Pang, T.W.S. "Removal of asbestos fibres from potable water by coagulation and filtration" (Élimination des fibres d'amiante par coagulation et filtration de l'eau potable); Water Research 9:397-400; 1975.

71. "U.S. Patent 4,181,607: Removing asbestos fibres from water" (Brevet des É.-U. 4 181 607 "Élimination des fibres d'amiante de l'eau"); Asbestos Bull 22: résumé 522; 1981.

72. Wierig, H.J. "Chemischer Angriff auf Zement-gebundene Baustoffe" (Corrosion chimique des matériaux de construction liés au ciment); Techn Wiss. Schriftenr ATV 1978:7:27-36.

73. Schremmer, H. "Bildung der Schwefelsaeure in Abhaengigkeit von H_2S Gehalt und von der Temperatur in Abwasseranlagen" (Formation d'acide sulfurique en fonction de la concentration en H_2S et de la température dans les égouts); Techn. Wiss. Schriftenr ATV 1978:7:15-26.

AUTORISATIONS DE REPRODUCTION

Nous remercions infiniment les organismes concernés de nous avoir accordé la permission de reproduire les documents ci-après:

American Concrete Institute and ACI Committee 201 (Tableau 2-6).
American Water Works Association (Tableau 4-6).
Journal of American Water Works Association (Tableaux 3-3, 3-4).
The Construction Press Ltd. (Longman Group Limited) (Tableau 3-2).
Electric Power Research Institute (Fig. 2-1).
GWF - Wasser, Abwasser (Tableau 2-3).
Geselleschaft fur Foerderung der Abwassertechnik, e.v. (GFA) (Fig. 2-6, 4-1, 4-5, 4-6; Tableaux 2-8, 4-4, 4-7, 4-8, 4-9).
Haley & Ward, Inc. (Tableau 4-5).
Physics Today (Fig. 1-1).
La Tribune Cebedeau (Tableau 2-5).
Von Wasser (Tableaux 2-2-, 2-7, 3-1).
John Wiley & Sons, Inc. (Fig. 3-1).

SONDAGE

L'opinion des lecteurs intéressés peut influencer l'orientation future des recherches à CANMET.

Nous vous invitons, donc, à évaluer le rapport - n° _____

Est-il utile?	Oui____	Non____
Traite-t-il d'un problème de l'industrie?	Oui____	Non____
Le sujet est-il prioritaire?	Oui____	Non____

Commentaires _____

_____

_____

Postez à: Rédacteur de CANMET, EMR, 555, rue Booth,
Ottawa, Ontario, K1A 0G1

Une copie gratuite de la REVUE DE CANMET sera envoyée sur demande.

CANMET REPORTS

Recent CANMET reports presently available or soon to be released through Printing and Publishing, Supply and Services Canada (addresses on inside front cover), or from CANMET Publications Office, 555 Booth St., Ottawa, Ontario, K1A 0G1:

Les récents rapports de CANMET, qui sont présentement disponibles ou qui le seront bientôt peuvent être obtenus de la direction de l'Imprimerie et de l'Edition, Approvisionnements et Services Canada (adresses au verso de la page couverture), ou du Bureau de vente et distribution de CANMET, 555, rue Booth, Ottawa, Ontario, K1A 0G1:

83-2E McMaster, An Allogenic Massive Sulphide Copper Deposit, Bathurst Area, New Brunswick; J.L. Jambor;
Cat. No. M38-13/83-2E, ISBN 0-660-11377-5; Price: $3.25 Canada, $3.90 other countries.

83-2F Le gisement McMaster, un gisement de sulfure de cuivre allogène massif dans la région de Bathurst au Nouveau-Brunswick; J.L. Jambor;
Cat. No. M38-13/83-2F, ISBN 0-660-91158-2; Price: $3.25 Canada, $3.90 à l'étranger.

83-4E An Evaluation of Two Methods for the Determination of Indium in Ores, Concentrates and Zinc Processing Products by Flame Atomic-emission and Flame Atomic-absorption Spectrophotometry; Elsie M. Donaldson;
Cat. No. M38-13/83-4E, ISBN 0-660-11394-5; Price: $3.00 Canada, $3.60 other countries.

83-5E Industrial Minerals - Problem Areas and Opportunities; R.K. Collings and P.R.A. Andrews;
Cat. No. M38-13/83-5E, ISBN 0-660-11411-9; Price: $6.25 Canada, $7.50 other countries.

83-5F Problèmes et aspects favorables des minéraux industriels; R.K. Collings et P.R.A. Andrews;
Cat. No. M38-13/83-5F, ISBN 0-660-91251-1; Price: $6.25 Canada, $7.50 à l'étranger.

83-8E Alkalai Resistant Fibres - A Review; S.S.B. Wang;
Cat. No. M38-13/83-8E, ISBN 0-660-11542-5; Price: $3.25 Canada, $3.90 other countries.

83-8F Fibres résistantes aux alcalis: Étude documentaire; S.S.B. Wang;
Cat. No. M38-13/83-8F, ISBN 0-660-91293-7; Price: $3.25 Canada, $3.90 à l'étranger.

83-9E Radium 226 in Certified Uranium Reference Ores DL-1a, BL-4a, DH-1a and BL-5; C.W. Smith and H.F. Steger;
Cat. No. M38-13/83-9E, ISBN 0-660-11465-8; Price: $2.25 Canada, $2.70 other countries.

83-9F Radium-226 dans les minerais d'uranium de référence ores DL-1a, BL-4a, DH-1a and BL-5; C.W. Smith et H.F. Steger;
Cat. No. M38-13/83-9F, ISBN 0-660-91290-2; Price: $2.25 Canada, $2.70 à l'étranger.

83-10E TAN-1: A Certified Tantalum Reference Ore; H.F. Steger and W.S. Bowman;
Cat. No. M38-13/83-10E, ISBN 0-660-11504-2; Price: $2.50 Canada, $3.00 other countries.

83-10F TAN-1: Minerai de référence de tantale; H.F. Steger et W.S. Bowman;
Cat. No. M38-13/83-10F, ISBN 0-660-91291-0; Price: $2.50 Canada, $3.00 à l'étranger.

83-14E MP-2: A Certified Tungsten-molybdenum Reference Ore; H.F. Steger and W.S. Bowman;
Cat. No. M38-13/83-14E, ISBN 0-660-11541-7; Price: $3.00 Canada, $3.60 other countries.

83-14F MP-2: un minerai de référence certifié de tungstène-molybdène; H.F. Steger et W.S. Bowman;
Cat. No. M38-13/83-14F, ISBN 0-660-91285-6; Price: $3.00 Canada, $3.60 à l'étranger.

83-15E CANMET Review 1982-1983; Staff of Technology Information Division;
Cat. No. M38-13/83-15E, ISBN 0-660-11615-4; Price: $5.00 Canada, $6.00 other countries.

83-15F Revue de CANMET 1982-1983; Personnel de la division de l'information technologique;
Cat. No. M38-13/83-15F, ISBN 0-660-91278-3; Price: $5.00 Canada, $6.00 à l'étranger.

83-16E Asbestos/Cement pipe corrosion Part 1 - Historical, Technological Economic and Statistical Background; B. Nebesar;
Cat. No. M38-13/83-16E, ISBN 0-660-11557-3; Price: $2.50 Canada, $3.00 other countries.

83-20E Coal Mining in Canada: 1983; A.S. Romaniuk and H.G. Naidu;
Cat. No. M38-13/83-20E, ISBN 0-660-11616-2; Price: $6.00 Canada, $7.20 other countries.